

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**DESENVOLVIMENTO DA FASE INFORMACIONAL
PARA O REPROJETO DE UMA UNIDADE DE
RECUPERAÇÃO DE ENXOFRE**

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE
SANTA CATARINA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
DE ENGENHARIA MECÂNICA**

UBIRAJARA OLIVEIRA PINHEIRO

FLORIANÓPOLIS, ABRIL DE 2006

DESENVOLVIMENTO DA FASE INFORMACIONAL PARA O REPROJETO DE UMA UNIDADE DE RECUPERAÇÃO DE ENXOFRE

UBIRAJARA OLIVEIRA PINHEIRO

**Prof. Acires Dias, Dr. Eng.
Orientador**

**Júlio César Passos, Dr. Eng.
Coordenador**

Prof. Dr. Eng. Lauro Cesar Nicolazzi (Presidente)

Prof. Dr. Eng. André Ogliari

Prof. Dr. Eng. Carlos Augusto Silva de Oliveira

AGRADECIMENTOS

“Aos meus pais, pelo amor disseminado e cultivado;

A Lígia, Flora e Rebeca Pinheiro pelo presente exercício deste amor;

Ao Orientador e amigo Acires Dias, pelo profissionalismo, competência e dedicação;

A Mariza Pacheco pela ajuda sempre alegre na elaboração das figuras e gráficos.”

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	01
1.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DO PROJETO DA U-36	01
1.2 CARACTERIZAÇÃO OPERACIONAL DA U-36	02
1.3 ESTRUTURAÇÃO DO PROBLEMA	04
1.4 OBJETIVOS	06
1.5 METODOLOGIA	07
1.6 CONTEÚDO DA DISSERTAÇÃO	07
 2. A RLAM E A U-36	 09
2.1 INTRODUÇÃO	09
2.2 A RLAM E A PETROBRAS	09
2.3 A RLAM	11
2.3.1 Fluxo de produção da RLAM	12
2.4 ESTRUTURA ORGANIZACIONAL DA RLAM	13
2.4.1 Gerência de Manutenção Industrial	14
2.4.2 Gerência de Engenharia	15
2.4.3 Gerência de Otimização	16
2.4.4 Gerência de Produção	17
2.4.5. Gerência Setorial de Craqueamento de Resíduos	17
2.5 COMENTÁRIO FINAL	17
 3. O PROCESSO DE RECUPERAÇÃO DE ENXOFRE DA U-36	 19
3.1 INTRODUÇÃO	19
3.2 O PROCESSO CLAUS DE RECUPERAÇÃO DE ENXOFRE	20
3.3 A UNIDADE DE RECUPERAÇÃO DE ENXOFRE U-36 DA RLAM	22
3.3.1 Descrição da carga da Unidade 36	22
3.3.2 Descrição do processo da U-36	25
3.4 CARACTERIZAÇÃO DO PERIGO PRESENTE NA OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DAS SUBSTÂNCIAS QUE CONTÊM ENXOFRE	27
3.4.1 Principais barreiras recomendadas para prevenir e evitar explosão de gás	28
3.4.2 Medidas de segurança para se evitar queima de enxofre	29
3.4.3 Medidas de precaução para se evitar solidificação de enxofre	29

3.4.4 Medidas de precaução para se evitar corrosão da planta	30
3.5 O PROBLEMA DE OBSTRUÇÃO DE LINHAS E EQUIPAMENTOS DA U-36	30
3.6 HISTÓRICO LEVANTADO QUANTO À EVOLUÇÃO DOS PROBLEMAS DA U-36	32
3.7 COMENTÁRIO FINAL	32

4. FUNDAMENTOS DO ATRIBUTO DE DISPONIBILIDADE ____ 34

4.1 INTRODUÇÃO	34
4.2 CONFIABILIDADE	34
4.3 FMEA	35
4.3.1 FMECA	36
4.3.2 Informações a serem trabalhadas durante a realização da FMEA/FMECA	38
4.3.3 Quando se iniciar uma FMEA /FMECA	41
4.3.4 A Equipe participante de uma FMEA	41
4.3.5 Principais etapas para execução da FMEA/FMECA	43
4.4 UM MODELO DE GERENCIAMENTO DE MANUTENÇÃO CENTRADO EM DISPONIBILIDADE	44
4.4.1 Considerações adicionais para alteração da estratégia de manutenção	47
4.5 MODELO CONFIABILÍSTICO DA U-36	48
4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	48

5. ANÁLISE FUNCIONAL APLICADA À U-36 _____ 51

5.1 INTRODUÇÃO	51
5.2 ANÁLISE FUNCIONAL: CONCEITOS PRINCIPAIS	52
5.2.1 Análise da estrutura funcional de um sistema	52
5.3 A ANÁLISE FUNCIONAL DA U-36	54
5.3.1 Sistema de alimentação	55
5.3.2 Sistema de reação térmica e recuperação de calor	55

5.3.3 Conversão catalítica e condensação	56
5.3.4 Incinerador	58
5.3.5 Sistema de armazenamento de enxofre	58
5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	60

6. INFLUÊNCIA DOS ATRIBUTOS DE MANUTENÇÃO DA U-36 NA DEFINIÇÃO DA SUA ESTRATÉGIA DE MANUTENÇÃO

6.1 INTRODUÇÃO	62
6.2 O ATRIBUTO CUSTOS	64
6.2.1 O fator custos na indústria de petróleo	64
6.2.2 A influência do fator custos na sobrevivência de um produto	67
6.3 O ATRIBUTO DISPONIBILIDADE	70
6.3.1 O indicador disponibilidade da U-36	70
6.3.2 Disponibilidade e as estratégias de manutenção em unidades de recuperação de enxofre	71
6.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	74

7. DESENVOLVIMENTO DAS ESPECIFICAÇÕES PARA O REPROJETO DA U-36

7.1 INTRODUÇÃO	76
7.2 METODOLOGIAS DE PROJETO	76
7.3 A ETAPA DO PROJETO INFORMACIONAL (ESCLARECIMENTO DA TAREFA)	77
7.3.1 Definição das necessidades de projeto	80
7.3.2 Conversão das necessidades em requisitos de usuários e em requisitos de projeto	80
7.3.3 Conversão dos requisitos de projeto em especificações de projeto	81
7.4 QUESTIONÁRIO UTILIZADO NA U-36	82
7.4.1 O Questionário	82
7.4.2 Resultados obtidos com a aplicação do questionário	84
7.5 ANÁLISE DA FMECA DA U-36	85
7.5.1 Comentários sobre as causas e ações recomendadas identificadas na FMECA	86

7.5.2 Análise dos resultados da FMECA	92
7.6 REQUISITOS DOS USUÁRIOS E DE PROJETO PARA A U-36	97
7.6.1 Requisitos de projeto necessários para a U-36	98
7.6.2 Estabelecimento dos requisitos de projeto a partir da ferramenta QFD	101
7.7 ELABORAÇÃO DA LISTA DE ESPECIFICAÇÃO PARA O REPROJETO DA U-36	102
7.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS	104
8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	106
8.1 INTRODUÇÃO	106
8.2 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS	108
8.3 CONCLUSÕES	108
8.4 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	110
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	
ANEXO I: QUESTIONÁRIO APLICADO AOS USUÁRIOS DA UNIDADE U-36	
ANEXO II : FMECA	

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Diagrama de fluxo de gás ácido para a U-36	03
Figura 2.1: Esquema básico de refino na indústria de petróleo (Revista Petrobras, 2004)	11
Figura 2.2: Processamento de petróleo da RLAM (Dados anuais RLAM, 2004)	13
Figura 2.3: Estrutura organizacional da RLAM (Dados anuais RLAM, 2004)	14
Figura 2.4: Estrutura Organizacional da Gerência de Manutenção Industrial (Dados anuais RLAM, 2004)	15
Figura 2.5: Modelo de gestão da RLAM (Dados RLAM, 2004)	16
Figura 3.1: Suprimento X Demanda de enxofre no mundo (Sulphur, 2005)	20
Figura 3.2: Processo Claus modificado (Sulphur, 2005)	21
Figura 3.3: Diagrama simplificado do processo de fabricação de enxofre da U-36	26
Figura 4.1: Diagrama esquemático do gerenciamento de manutenção centrado em disponibilidade (Santos, 1999)	45
Figura 4.2: Correlação existente entre Disponibilidade, Confiabilidade e Manutenabilidade (Dias, 1996)	46
Figura 4.3 : Sistema de gerenciamento de manutenção centrado em disponibilidade (Santos, 1999)	47
Figura 4.4: Representação de um sistema composto em série (Dias, 2003)	48
Figura 5.1: Modelo funcional da U-36, adaptado de Carrafa (2002)	54
Figura 5.2: Sistema de conversão catalítica e condensação (Manual de Operação da U-36, 1997)	57
Figura 6.1: Rentabilidade da indústria de refino no período 1986-1992	64
Figura 6.2: Evolução do custo de manutenção da indústria de refino. Período 1986-1992 (Rickets, 1994)	65

Figura 6.3: Resultados de manutenção em indústrias de refino que apresentaram maiores custos. (Rickets, 1994)	66
Figura 6.4: Custos ao longo do ciclo de vida de um produto (Blanchard, 1995)	68
Figura 6.5: Relação entre custos e idade do equipamento (Blanchard, 1992)	69
Figura 6.6: Relação entre disponibilidade e estratégias de manutenção em unidades de recuperação de enxofre	73
Figura 7.1: Metodologia de projeto desenvolvida pelo Nedip (Matos, 1999)	79
Figura 7.2: Diferença de conceituação entre projeto e reprojeção (Ferreira, 1997)	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Relação entre os tópicos a serem pesquisados na dissertação com as gerências da RLAM	18
Tabela 3.1: Classificação do gás ácido segundo os teores de H ₂ S (Barrow, 2001)	23
Tabela 3.2: Composição de gás ácido das unidades U-6 e U-39	24
Tabela 4.1: Probabilidade de ocorrência (BEM-DAYA e RAOUF, 1996)	37
Tabela 4.2: Severidade dos efeitos (BEM-DAYA e RAQUF, 1996)	37
Tabela 4.3: Índice de detecção das falhas (BEM-DAYA e RAQUF, 1996)	38
Tabela 6.1: Períodos em que a U-36 esteve em operação (Fonte: Plant Information, RLAM, 2005)	71
Tabela 7.1: Resumo dos tópicos abordados no questionário aplicado na U-36	83
Tabela 7.2: Tabulação dos resultados do questionário aplicado	84
Tabela 7.3: Efetividade das ações recomendadas X NPR	92
Tabela 7.4: Resumo da FEMECA da U-36	93
Tabela 7.5: Requisitos do usuário X Requisitos de projeto da U-36	100
Tabela 7.6: Relacionamento entre os Requisitos do usuário e Requisitos de projeto da U-36 segundo ferramenta QFD	102

LISTA DE QUADROS

Quadro 5.1: Funções do sistema de alimentação da U-36	55
Quadro 5.2: Funções do sistema térmico e de recuperação de calor	56
Quadro 5.3: Funções do sistema de conversão catalítica e condensação	59
Quadro 5.4: Funções do sistema incinerador	60
Quadro 5.5: Funções do sistema de armazenamento de enxofre	60

LISTA DE ABREVIATURAS

FOI: Fator Operacional Interno
FMEA: “Failure Mode and Effect Analysis”
FMECA: “Failure Mode and Effect Criticality Analysis”
H ₂ S :Ácido Sulfídrico
HC:Hidrocarbonetos
HCN: Ácido cianídrico
MTBF:Tempo médio entre falhas
MTTR:Tempo médio total de reparo
Nm ³ : Normais metros cúbicos
NPR:Número de Prioridade de Risco
RLAM: Refinaria Landulpho Alves de Mataripe
SO ₂ : Dióxido de enxofre
U-4: Unidade de Destilação 4 da RLAM
U-7/8: Unidades Fracionadoras 7/8 da RLAM
U-9: Unidade de Destilação Atmosférica da RLAM
U-6:Unidade de craqueamento catalítico da RLAM
U-21: Unidade de Produção de Asfalto da RLAM

U-30/31: Unidades de N-Parafina da RLAM

U-36: Unidade de Recuperação de Enxofre da RLAM

U-39: Unidade de Craqueamento Catalítico da RLAM

U-80: Unidade e Águas Ácidas da RLAM

RESUMO

A necessidade de se manter uma confiabilidade operacional e disponibilidade adequada nas unidades industriais, especificamente refinarias de petróleo e unidades petroquímicas, tem sido determinante quanto ao aspecto de sobrevivência destas empresas nos tempos atuais, caracterizados por uma ambiência de alta competitividade e busca incessante de superação de desafios. A partir do problema detectado quanto à baixa confiabilidade operacional e disponibilidade oferecidas pela Unidade de Recuperação de Enxofre (U-36) da Refinaria Landulpho Alves da Petrobras (RLAM) desde o início da sua operação em 2001, a presente dissertação procura indicar meios para melhoria destes atributos através da investigação quanto à necessidade de reprojetar a mesma, cujo desempenho é de extrema importância para a obtenção dos resultados desta Refinaria, com impactos diretos no seu faturamento e sistemas de proteção ao meio-ambiente. Neste sentido esta dissertação propõe uma metodologia para análise do tipo de gerenciamento de manutenção atualmente utilizado nesta unidade, enfatizando-se a necessidade de realização de reprojetar para alguns dos seus sistemas a partir de uma análise funcional dos mesmos e identificação dos principais desvios que têm levado a estes resultados insatisfatórios. Esta metodologia encontra-se baseada em metodologias já devidamente difundidas e consagradas com destaque à metodologia de processo de projeto do NeDIP (Núcleo do Desenvolvimento Integrado de Produtos do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC) e uso de ferramentas de confiabilidade tais como análise dos modos de falha e efeitos (FMEA), e de modelos confiabilísticos para auxiliar na análise e sistematização da solução do problema proposto. Vale-se ressaltar que na presente dissertação as propostas apresentadas estarão restritas às etapas do projeto informacional, com vistas a subsidiar e estruturar o encaminhamento do reprojetar proposto para a U-36. Os dados trabalhados nesta dissertação serão obtidos a partir das seguintes fontes:

(1) Estudo dos históricos de manutenção e análise dos modos de falha da U-36 para poder caracterizar o atributo da manutenibilidade; (2) Entrevistas elaboradas a partir de questionários estruturados e não estruturados para captar o conhecimento e opiniões dos projetistas, operadores e mantenedores quanto à problemática da U-36 envolvendo os aspectos de confiabilidade e manutenibilidade; (3) Pesquisa sobre problemas e soluções que envolvem os atributos de confiabilidade operacional e manutenibilidade de sistemas

técnicos na indústria de processo no campo da química e petroquímica realizada com auxílio de documentos técnicos de projeto e relatórios de ações de operação e manutenção nos registros da Petrobras e em literatura técnica e científica de publicações. Como resultado é esperado apresentar-se uma metodologia que contemple os objetivos propostos, a fim de serem levantadas as informações necessárias para o reprojeto da U-36 e que servirão de base às fases subseqüentes de projeto, cuja execução possibilitará a melhoria da disponibilidade e confiabilidade operacional desta unidade.

Palavras chaves: Refinaria de petróleo, Unidade de recuperação de enxofre, reprojeto, projeto informacional.

ABSTRACT

The Landulpho Alves Refinery (RLAM) has a Sulphur Recovery Unit (U-36) which has had bad results in terms of operational reliability; availability and maintainability since this unit started up in the ends of 2001. These facts threaten RLAM's results in terms of profits and environments goals. In order to change it, this dissertation come up with a methodology that change the actual management maintenance in course, lighting up the needing of making a redesign for the systems and equipments that present the largest deviation in terms of the their respective original functions. This methodology is also based on the NEDIP ("Núcleo de Desenvolvimento Integrado de Produtos do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC") Project Methodology, FMEA reliability tool, and Functions Analyses Method. This dissertation will work only in the Information Phase (first phase of the project methodology mentioned above), getting all the information that must be detailed in the following phases in order to make the redesign and then, correct the problems of operational reliability, availability and maintainability of the unit U-36.

All data and information used will be gathered by the following ways:

- 1) Maintenance reports and failure mode analysis of the main events that have occurred in U-36 since the start-up of the unit.
- 2) Interviews elaborated in questionnaires where can be gathered the opinions of the operational, maintenance and project teams about the problems of U-36 involving reliability and maintainability aspects.
- 3) Resources about problems and solutions in SRU (sulphur recovery units) and petrochemical units involving reliability and maintainability aspects.

The results expected with the methodology of the dissertation are to provide a framework to retrieve information that will feed the redesign of U-36. After their implementation the availability and operational reliability results of the U-36 can become better.

Key words: Petroleum Refinery, Sculpture Recovery Unit, redesign.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Uma refinaria de petróleo é uma planta industrial que processa o produto fóssil petróleo, produzindo-se a partir do mesmo uma série de produtos obtidos geralmente a partir da quebra das grandes cadeias moleculares que o compõem. Estas atividades requerem um conjunto de unidades de processamento de petróleo propriamente dito, capazes de efetuar estas transformações, e de outras unidades auxiliares, sejam para produzir as utilidades (vapor, ar-comprimido, energia elétrica, etc.) necessárias ao funcionamento das unidades de processamento, sejam para tratamento dos efluentes gerados no processamento. Todo este processo necessita que as atividades funcionem de forma equilibrada tanto energeticamente, como sem agressão ao meio-ambiente.

A unidade de processamento de enxofre é um exemplo de unidade utilizada para o tratamento de efluentes gerados no processamento. Logo, é uma unidade importante para tratar os resíduos a base de enxofre que são gerados em algumas destas unidades de processamento, produzindo-se a partir da mesma o enxofre sólido, que além de evitar a contaminação atmosférica devido aos resíduos citados, é utilizado como matéria-prima para produção de fertilizantes.

Em face de problemas operacionais existentes que levam esta unidade de recuperação de enxofre da refinaria Landulpho Alves de Mataripe (RLAM) a não atingir os requisitos de projeto estabelecidos originalmente, propõe-se nesta dissertação apresentar um estudo para fundamentar as decisões a serem tomadas na atividade de reprojeção da unidade. Neste capítulo serão apresentadas algumas informações preliminares desta unidade e os objetivos e resultados a serem obtidos com este estudo.

1.1 Características gerais do projeto da U-36

A Unidade de Recuperação de enxofre (U-36) da refinaria Landulpho Alves da Petrobras teve a sua construção iniciada em 1998, tendo operado a partir junho de 2002. As informações de projeto indicam que a Unidade 36 foi projetada para o tratamento de 2.826 Nm³/h de gás ácido (capacidade nominal) e produção de 72 ton/dia de enxofre. A

flexibilidade operacional tem uma abrangência de 45 a 120 por cento. Significa que a unidade pode operar com uma capacidade de processamento entre 1.271 Nm³/h até 3.391 Nm³/h de gás ácido. As informações de projeto indicam uma capacidade de recuperação de enxofre da ordem de 97 %. Além disso, as correntes fornecedoras de gás ácido devem conter um teor de hidrocarbonetos (HC) limitados a 2 %.

A Unidade de Recuperação de Enxofre U-36 foi projetada para processar o enxofre a partir das correntes de gás ácido derivadas das seguintes unidades com suas respectivas vazões:

- 1) Unidade de Tratamento de Água Ácida (U-80): 386 Nm³/h;
- 2) Seção de Tratamento de Aminas da Unidade de Craqueamento Catalítico U-39: 2.330 Nm³/h;
- 3) Seção de Tratamento de Aminas da Unidade de Craqueamento Catalítico da U-6: 110 Nm³/h.

1.2. Caracterização operacional da U-36

Atualmente a U-36 tem operado recebendo gás ácido proveniente apenas da U-39 a uma vazão de 2.300 Nm³/h. Esta vazão representa aproximadamente 80% da capacidade prevista para a unidade. As correntes de gás ácido originadas nas unidades U-6 e U-80 não se enquadram dentro dos parâmetros requeridos para a U-36, por apresentarem um teor de hidrocarbonetos bem superior a 2% (U-6) e devido à existência de grande quantidade de água presente na corrente de gás ácido (U-80). As especificações para as correntes de gás ácido para cada uma das unidades encontram-se discriminadas no Capítulo 3 desta dissertação. A figura 1.1 representa o fluxo de envio de gás ácido previsto para a U-36. As unidades U-39 e U-6 são unidades de craqueamento catalítico e, portanto recebem entradas de matérias-primas provenientes das unidades de destilação da RLAM (U-4, U-9 e U-32). Já a U-80 é a Unidade de Tratamento de Águas Ácidas da RLAM recebendo contribuições de todas as unidades de processamento desta refinaria. O enxofre produzido na U-36 é enviado para os clientes na Seção de Expedição desta unidade onde o mesmo é devidamente embalado. Deve-se ressaltar ainda que os reflexos para a RLAM decorrentes da paralisação de operação da U-36 são basicamente a interrupções da produção de enxofre sólido, além do efeito mais significativo que é a poluição do meio-ambiente por resíduos de enxofre

decorrente do envio de todo o gás ácido produzido nas unidades citadas para a atmosfera.

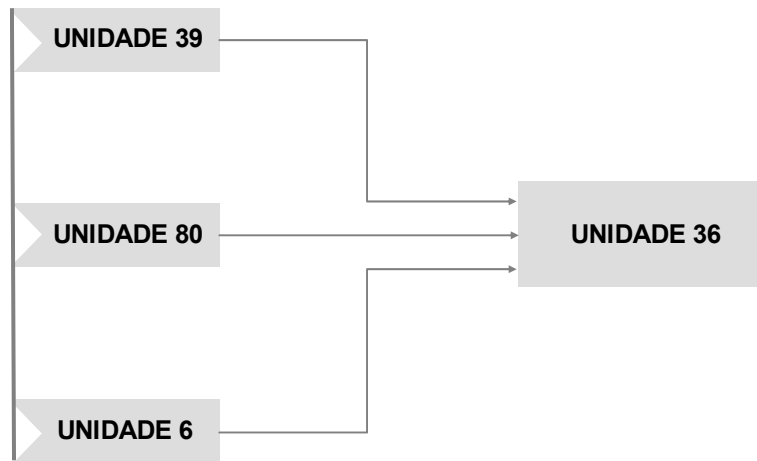


Figura 1.1: Diagrama de fluxo de gás ácido para a U-36

A U-36 tem apresentado problemas de baixa confiabilidade operacional provocada principalmente pela ocorrência de obstrução de enxofre no interior das linhas e equipamentos da unidade, o que tem levado a paralisações operacionais desta unidade e adicionalmente, a um tempo de reparo muito elevado para solução das mesmas devido a uma baixa manutenibilidade. Isto, como é de se esperar, gera a baixa disponibilidade existente da planta. Estas obstruções são devidas geralmente ao resfriamento indevido do enxofre o que acarreta a solidificação do mesmo em alguns equipamentos e sistemas da unidade. Do ponto de vista operacional estes problemas estão associados a uma deficiência energética do fluxo de gás ácido, o que compromete o processo de reação térmica necessário para recuperação de enxofre. Este fato é devido à combinação de dois fatores:

- 1) Deficiência de vazão total de alimentação de gás ácido para a U-36;
- 2) Teor de H_2S (Ácido Sulfídrico) existente na corrente de gás ácido originada da U-39 é inferior ao especificado para a Unidade 36 (os dados de projeto da U-36 prevêm uma concentração de H_2S na corrente de gás ácido de 72 % enquanto que a concentração real verificada é de 39 % conforme será visto no Capítulo 3), comprometendo, deste modo, o processo de reação térmica necessário para recuperação do enxofre.

1.3. Estruturação do problema

Considerando-se o problema apresentado de baixa confiabilidade operacional e baixa disponibilidade apresentadas pela U-36 e baseando-se no histórico de falhas analisado da unidade, procurou-se inferir ou levantar algumas questões preliminares quanto às causas dos problemas mencionados. Elas visam sistematizar o pensamento no sentido de apresentar, ou melhor fundamentar a proposta de solução para este problema.

Partindo-se da premissa que o principal atributo do projeto no contexto desta análise é a confiabilidade, a mesma depende de alguns parâmetros tais como probabilidade, tempo, condição operacional e adequação ao projeto, conforme será visto no capítulo 4 desta dissertação. Os parâmetros “probabilidade” e “tempo” não poderão ser analisados nesta dissertação em face do pouco tempo de operação e da falta de dados existente. Deste modo os parâmetros “condição” e “adequação operacional” ganham importância na análise aqui desenvolvida, adquirindo um destaque em relação aos demais parâmetros.

Pelo estudo inicialmente feito, verificou-se que a indisponibilidade operacional da U-36 é muito elevada. Sabe-se que a indisponibilidade é um atributo que está relacionado com a confiabilidade e com a manutenibilidade, estando estas últimas relacionadas respectivamente com as taxas de falha ($\lambda(t)$) e com as taxas de recolocação ($\mu(t)$) dos sistemas técnicos. Devido a isto, a pesquisa para estruturação de um reprojeto e atualização tecnológica da unidade também leva em consideração estes atributos.

Em face da problemática apresentada, foram levantadas assim algumas questões preliminares visando facilitar a identificação correta do problema que está sendo apresentado. Metodologicamente, as questões citadas visam ajudar a orientação da pesquisa no sentido de encontrar um foco que facilite estabelecer de forma clara e evidente os seus objetivos. As seguintes questões preliminares foram elaboradas:

1. O projeto da U-36, notadamente a sua vazão total necessária de gás ácido, não está de acordo com as capacidades reais de fornecimento das unidades U-39, U-6 e U-80;
2. A flexibilidade projetada para U-36 em termos da vazão necessária de gás ácido, não está condizente com a flexibilidade real verificada, devido ao fato da U-36 não conseguir operar de forma satisfatória exclusivamente com a vazão de gás ácido oriunda da U-39;

3. O projeto da U-36 não está compatível com as condições reais de operação das unidades U-6 e U-80 com relação às especificações do gás ácido destas unidades (vazão, teor de HC e nível de umidade contido no gás);
4. Os projetos de alguns equipamentos/sistemas da U-36 não estão compatíveis com as condições de vazão e temperatura reais verificadas, acarretando fluxos de gás ácido deficientes no interior dos mesmos que levam à obstrução destes equipamentos.

A partir destas questões levantadas acima foram formuladas as seguintes alternativas para solução do problema verificado na U-36:

Alternativa 1: Adequar a U-36 às condições de vazão de gás ácido fornecida apenas pela U-39 dado que esta é a única corrente de gás cujo teor de hidrocarbonetos se encontra de acordo com o especificado no projeto da unidade.

Alternativa 2: Adequar a U-36 para também processar o gás ácido originado nas unidades U-6 e U-80 além do gás originado na U-39, a fim de garantir o processamento de gás de todas as unidades demandantes.

Alternativa 3: Adequar as unidades U-6 e U-80 para fornecimento de gás ácido à U-36 dentro dos teores especificados de HC, permitindo-se deste modo aumentar a vazão de gás ácido fornecida à U-36.

Alternativa 4: Identificar os maiores desvios em relação aos dados de projeto da U-36 quanto aos parâmetros de vazão e temperatura do gás ácido ao longo da unidade para elaboração de sugestão de reprojeto dos equipamentos/sistemas aonde ocorrem os desvios.

Alternativa 5: Analisar problemas de confiabilidade e de manutenibilidade da U-36 que afetam mais significativamente a sua disponibilidade operacional para adoção de correções e reprojetos.

1.4. Objetivos

As questões preliminares e respectivas alternativas de solução citadas no item anterior apontam para três possibilidades de pesquisa ou três caminhos a serem seguidos para indicar claramente o problema e apontar soluções: 1) adequar as características do gás ácido de todas as unidades demandantes às características de projeto da U-36; 2) reprojetar a U-36 para que possa trabalhar com o gás ácido que advém das unidades que fornecem o gás; 3) apontar soluções para as não conformidades de projeto e/ou operacionais que estão mais fortemente relacionadas com os problemas de indisponibilidade, devido à baixa confiabilidade e difícil manutenibilidade da U-36.

Diante das abordagens apresentadas definiu-se como objetivo geral deste trabalho identificar os principais problemas que têm gerado as constantes indisponibilidades operacionais da U-36 e apontar as soluções mais adequadas ou, pelo menos, sugerir prioridade nas que tenham a maior probabilidade de sucesso. Para tanto, alguns objetivos específicos devem ser atingidos:

- Fazer um estudo dos requisitos, necessidades e especificações que foram elaboradas quando do planejamento e projeto da U-36.
- Estudar os históricos de falha da U-36 e caracterizar o modo de falha e o efeito da falha sobre a função do sistema, para poder caracterizar o atributo da confiabilidade.
- Estudar os históricos de manutenção e identificar as dificuldades nas ações de manutenção para poder caracterizar o atributo da manutenibilidade.
- Estruturar uma pesquisa com os projetistas, operadores e os mantenedores da unidade para racionalizar (representar) as suas percepções sobre os problemas reais que afetam a disponibilidade da U-36 e as possíveis soluções.
- Realizar uma análise funcional da U-36, dividindo-a em subsistemas para possibilitar uma verificação dos desvios de parâmetros localizadamente, permitindo-se desta forma o encaminhamento de propostas para o reprojeto da unidade naqueles casos em que houver contribuição mais efetiva para a baixa disponibilidade apresentada pela unidade.
- Estruturar as informações para serem utilizadas na fase de projeto informacional com o objetivo de reprojeto da U-36.

1.5. Metodologia

Para desenvolvimento de uma sistemática que possa apontar uma forma adequada de desenvolver processos de análises de problemas técnicos como o que está sendo apresentado será utilizada a metodologia composta do seguinte:

- Pesquisa em documentos técnicos de projeto e relatórios de ações de operação e manutenção nos registros da empresa;
- Pesquisa na literatura técnica e científica de publicações que relatem metodologias aplicadas para solução de problemas que envolvam os atributos de confiabilidade operacional e manutenibilidade de sistemas técnicos na indústria de processo no campo da química e petroquímica;
- Utilização de entrevistas, a partir de questionários estruturados e não estruturados para captar o conhecimento e opiniões dos projetistas, operadores e mantenedores quanto à problemática da U-36 envolvendo os aspectos de confiabilidade e manutenibilidade;
- Utilização das ferramentas de análise dos modos de falhas e efeitos (FMEA) e de modelos confiabilísticos para ajudar na análise e sistematização da solução do problema que está sendo apresentado e atingir os objetivos propostos.

1.6 Conteúdo da dissertação

Segue abaixo o conteúdo desta dissertação a partir de um breve resumo dos referidos capítulos que a compõem. No capítulo 2 foi realizada uma contextualização da U-36, ressaltando a sua importância no contexto da Petrobras e da Refinaria Landulpho Alves (RLAM) com a apresentação dos principais produtos e estrutura organizacional da RLAM e a relação dos mesmos com o problema da U-36 em questão.

No capítulo 3 foi apresentado o processo de recuperação de enxofre a partir dos gases ácidos produzidos no processamento da indústria de refino de petróleo e a descrição da U-36 com a caracterização dos principais constituintes com a qual esta unidade trabalha, bem como a descrição do processo operacional da U-36 e dos seus principais sistemas, visando-se possibilitar um melhor entendimento dos problemas operacionais existentes na unidade.

No capítulo 4 são descritos os principais fundamentos teóricos de confiabilidade necessários à sua contextualização nesta dissertação além das suas principais ferramentas com destaque à FMECA que será utilizada nesta dissertação. Ainda no capítulo 4 serão descritas as estratégias de manutenção e um modelo de gerenciamento de manutenção centrado em disponibilidade, que possibilita a adoção de uma estratégia de manutenção diferente daquela que vem sendo utilizada, caso o atributo da disponibilidade esteja com valor menor que o estabelecido.

No capítulo 5 serão abordados os temas relativos à descrição e conceituação envolvendo a estrutura funcional de um sistema. Será realizada ainda neste capítulo a divisão da U-36 nos seus principais sistemas constituintes com o objetivo de realização da análise funcional desta unidade, estabelecendo-se os principais equipamentos considerados em cada um dos mesmos. A apresentação das principais funções primárias e secundárias destes sistemas visa fornecer subsídios que facilitem o estabelecimento da análise dos históricos de falhas desta unidade, bem como a caracterização dos modos e efeitos das falhas sobre estas funções auxiliando deste modo a priorização na definição das soluções dos desvios das funções analisadas.

O capítulo 6 comenta a influência dos atributos de manutenção da U-36 na definição da estratégia de manutenção mais adequada à sua realidade, havendo a escolha assim da realização do reprojeto em alguns de seus sistemas como a forma de melhorar não apenas o atributo da disponibilidade, mas também dos seus custos de manutenção, cujos maus resultados verificados se encontram também relacionados com o mau desempenho da sua disponibilidade como será demonstrado.

No capítulo 7 serão apresentados as ferramentas e o processo metodológico recomendável para uma ação de reprojeto nesta magnitude, havendo a apresentação da metodologia de projeto escolhida para este fim e o detalhamento da primeira etapa da mesma que estabelece as informações e especificações necessárias às etapas de projeto seguintes. Embasado na metodologia citada, são estabelecidas as especificações necessárias para o reprojeto da U-36 cujas implementações de acordo com as etapas seguintes previstas, irão proporcionar a melhoria da disponibilidade requerida para esta unidade.

No capítulo 8 são comentadas as conclusões verificadas bem como encaminhadas algumas recomendações para trabalhos futuros sobre o tema proposto nesta dissertação.

CAPÍTULO 2

A RLAM E A U-36

2.1 Introdução

Visando-se melhor contextualizar a Unidade de Recuperação de Enxofre U-36 da Refinaria Landulpho Alves de Mataripe (RLAM) da Petrobras, objeto desta pesquisa de dissertação, será realizada neste capítulo uma breve apresentação da RLAM, da qual a U-36 é uma das 23 unidades de processamento. Será apresentada a sua estrutura, os seus principais produtos, bem como a sua importância para as comunidades vizinhas, além do importante papel que representa como fonte arrecadadora para o Estado da Bahia e para a Petrobras.

Será também apresentada a estrutura organizacional da RLAM e a relação das suas respectivas gerências com o problema da U-36 em análise nesta dissertação.

2.2 A RLAM e a Petrobras

A Petrobras (Petróleo Brasileiro S.A.), maior empresa do Brasil e da América Latina, é uma empresa de economia mista que atua em todos os ramos da indústria de petróleo, desde a exploração até a distribuição de derivados. Para dar evidência a esta afirmativa apresenta-se algumas informações econômicas relativas ao ano de 2004, obtidas na página eletrônica da empresa (www2.petrobras.com.br, consultado em 18/12/2005), tais como:

- Receitas líquidas: R\$ 108.201.975 (mil)
- Lucro líquido: R\$ 17.860.754 (mil)
- Liderança de Mercado (Químico e Petroquímico): 57,8%;
- Riqueza criada por empregado: U\$ 755,2 mil;
- Maior exportadora brasileira: U\$ 4,4 bilhões ressaltando-se a exportação de 228 mil barris por dia (bpd) (1508 m³/h) de derivados e 181 mil bpd (1197,3 m³/h) de petróleo;
- Contribuições econômicas (impostos, encargos sobre faturamento, etc.): R\$ 36,2 bilhões;

- Investimentos em segurança, meio-ambiente e saúde: R\$ 6,1 bilhões (sendo que 2,3 bilhões em 2003).

O refino de petróleo é uma das atividades desenvolvidas pela Petrobras constituindo-se em um dos seus segmentos de negócio. O parque de refino da Petrobras é constituído de 15 refinarias, que representam uma capacidade total de refino de aproximadamente 2.125 barris por dia.

De uma forma simplificada o refino se constitui na transformação do petróleo bruto em derivados (frações mais leves), obtida a partir da ruptura de extensas cadeias moleculares que constituem o petróleo em cadeias menores, resultando-se em hidrocarbonetos de menor peso molecular. São assim obtidos produtos tais como GLP, gasolina, querosene de aviação, nafta e tantos outros. A figura 2.1 representa de forma simplificada o esquema básico de refino da indústria petrolífera. O petróleo é extraído do subsolo terrestre ou marítimo, e é conduzido por navios ou oleodutos até os tanques de recebimento das refinarias. A partir daí o petróleo é aquecido em fornos apropriados e enviado para as unidades de destilação aonde ocorre a quebra inicial das moléculas de carbono e a separação de alguns produtos leves. Em seguida estes subprodutos são bombeados para outras unidades de processamento aonde são obtidos os demais produtos derivados.

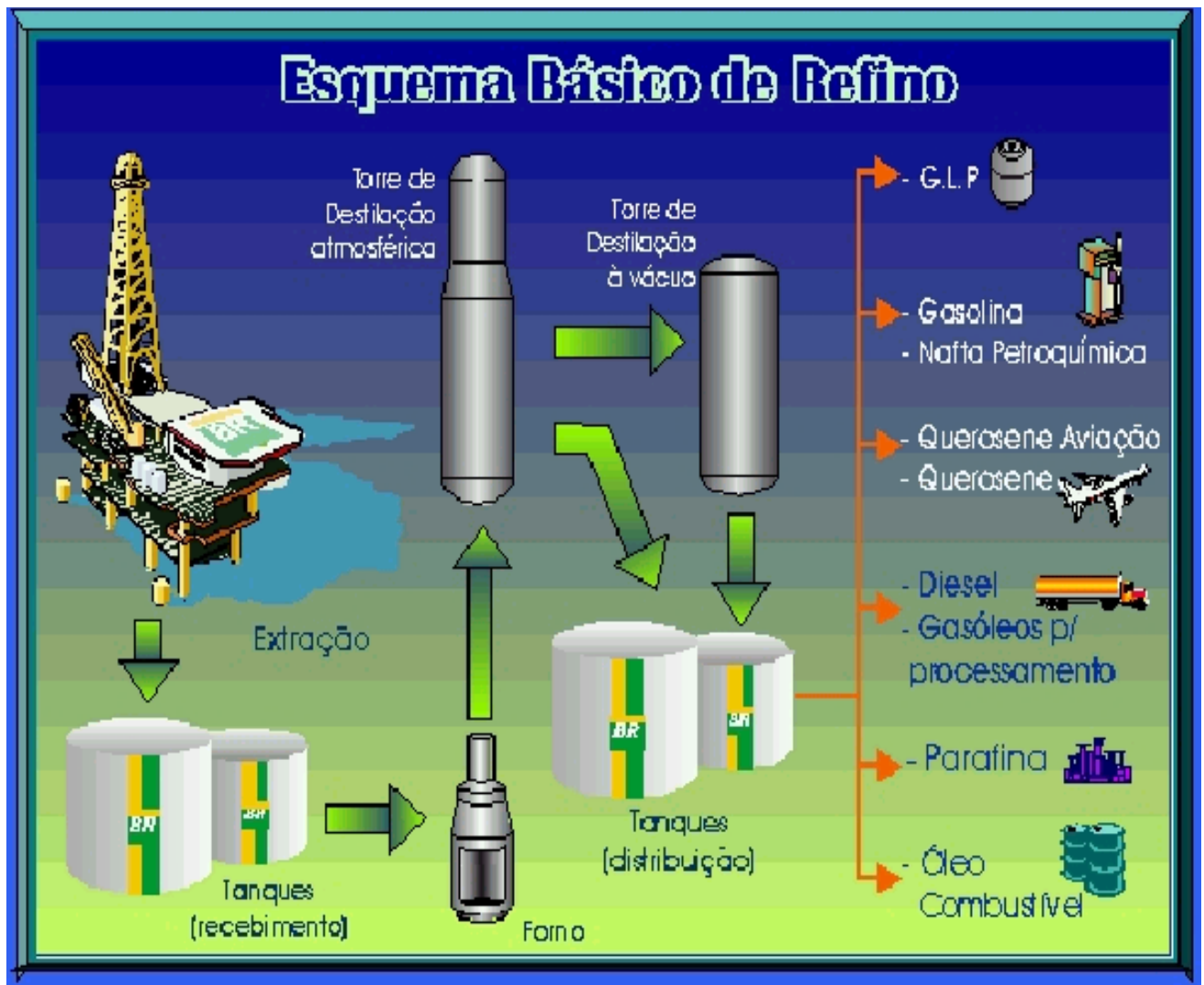


Figura 2.1: Esquema básico de refino na indústria de petróleo (Revista Petrobras, 2004).

2.3 A RLAM

A Refinaria Landulpho Alves de Mataripe (RLAM) é a segunda maior refinaria da Petrobras em produção de derivados com uma produção de 307.000 barris/dia (2030,8 m³/h) e a segunda maior em complexidade (possui 23 unidades produzindo 36 produtos acabados).

A RLAM iniciou as suas atividades em 17 de setembro de 1950 produzindo naquela ocasião 400 m³ /dia (2.519 barris/dia). Esta longa existência faz com que coexistam na RLAM unidades com projetos já relativamente antigos com outras unidades com concepção de projetos de última geração, exigindo-se assim grande flexibilidade operacional da sua equipe. A sua logística de produção e distribuição de

produtos encontra-se integrada nos modais dutoviário, rodoviário, marítimo e ferroviário.

A RLAM possui um faturamento anual de R\$ 8,016 milhões, sendo a maior recolhadora de ICMS para o Estado da Bahia. Possui um efetivo de 950 empregados próprios e cerca de 900 empregados terceirizados. (Fonte: Dados da Petrobras, 2004). Os seus principais produtos podem ser classificados em 5 categorias: Combustíveis, Parafinas, Petroquímicos, Lubrificantes básicos e Produtos especiais.

A RLAM abastece principalmente o mercado da região Nordeste do País, destinando para esta região a maior parcela da sua produção conforme discriminado abaixo:

- 81,20 % : Região Nordeste;
- 2,80 % : Regiões Norte, Sul e Sudeste;
- 16,00 % :Exportação.

2.3.1 Fluxo de produção da RLAM

A RLAM processa um volume de óleo de 42.700 m³/dia. O petróleo armazenado em tanques é bombeado para as unidades de destilação U-4,U-9 e U-32 onde é produzido o gasóleo de petróleo (GOP) utilizado como matéria-prima das unidades de craqueamento catalítico U-6 e U-39. Ainda nas unidades de destilação são produzidas algumas frações como diesel, nafta e óleo combustível.

Nas unidades de craqueamento catalítico ocorre a quebra das cadeias maiores de hidrocarbonetos em cadeias menores. A partir das unidades de craqueamento catalítico (U-6 e U-39) são produzidos a gasolina, o GLP e o propeno.

As unidades de craqueamento produzem o gás ácido como resultante dos seus processos, sendo o referido gás encaminhado para a U-36 (Unidade de Recuperação de Enxofre) sendo esta unidade o objeto do estudo desta dissertação. A RLAM possui ainda outras unidades (total de 23), que entretanto não serão mencionadas nesta dissertação uma vez que não possuem uma interação com a U-36 relacionada com o foco do problema a ser analisado.

A figura 2.2 apresenta um diagrama simplificado do processamento de petróleo e LGN (gás natural liquefeito) relacionado com a produção de GOP (Gasóleo) da RLAM citando algumas das respectivas unidades de processamento relacionadas ao

mesmo. A referida figura 2.2 representa também a U-80 (Unidade de Tratamento de Águas Ácidas) que como pode ser observado, recebe resíduos das diversas unidades de processamento, gerando a partir dos mesmos uma parcela de gás ácido que também deverá ser tratado pela U-36.

PROCESSAMENTO DE PETRÓLEO-RLAM

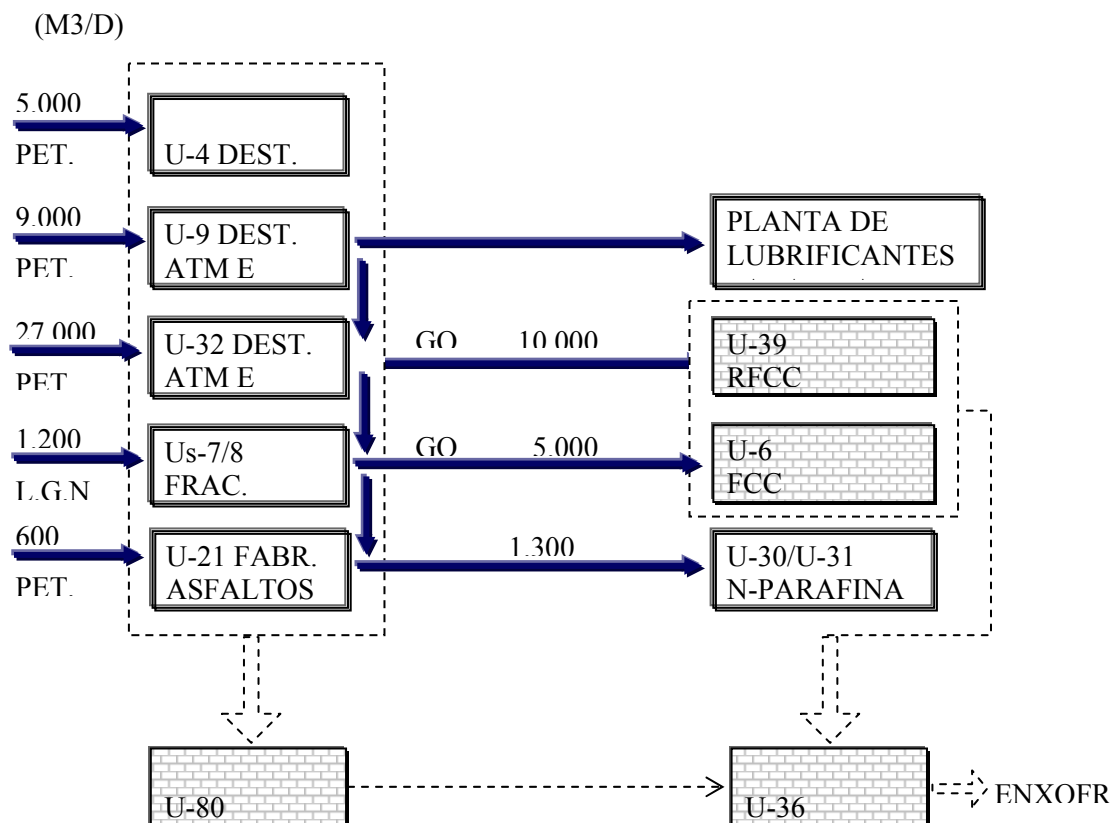


Figura 2.2: Processamento de petróleo da RLAM (Publicação dos dados anuais RLAM,2004).

2.4 A Estrutura organizacional da RLAM

A RLAM apresenta uma estrutura organizacional baseada na funcionalidade, contando com 12 Gerências diretamente ligadas à Gerência – Geral da Refinaria que por sua vez encontra-se ligada à Diretoria-Executiva, Diretoria de Abastecimento e Presidência da Petrobras. As 12 Gerências são compostas de Gerências Setoriais e Coordenadorias.

A figura 2.3 representa a estrutura organizacional da RLAM.

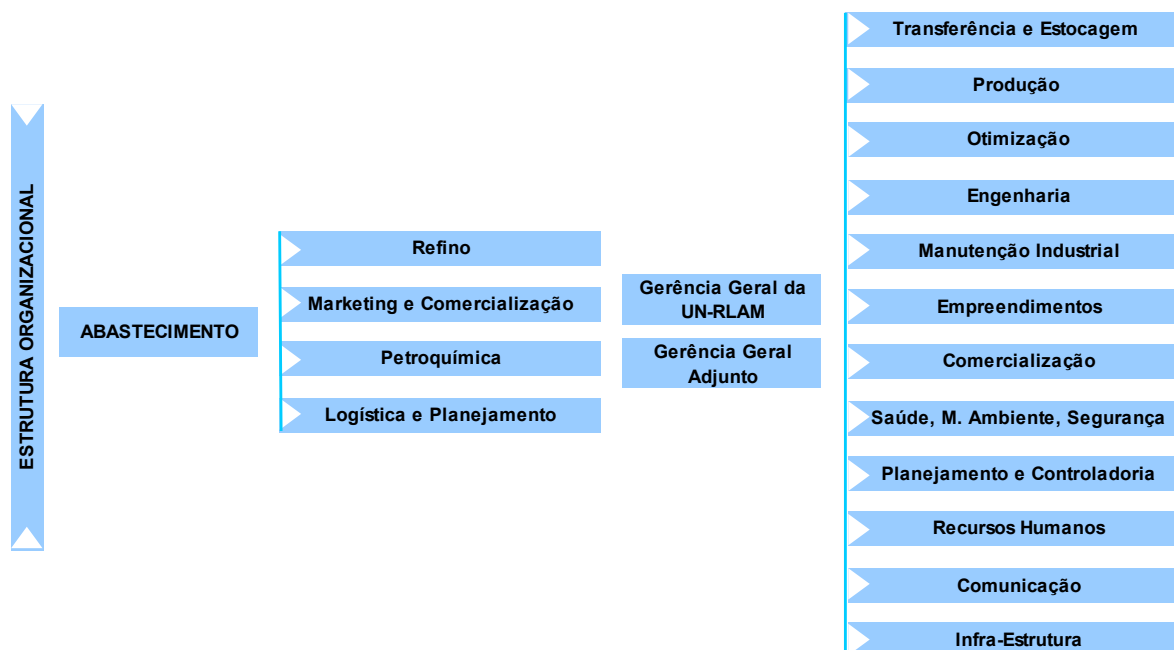


Figura 2.3: Estrutura organizacional da RLAM (Publicação dos Dados anuais RLAM, 2004).

Visando-se discriminar a relação entre o problema desta dissertação e a estrutura organizacional da RLAM, serão descritas abaixo as gerências que mais estão relacionadas com o mesmo.

2.4.1 Gerência de Manutenção Industrial

A Gerência de Manutenção Industrial é composta por 5 gerências setoriais. Ela é responsável por toda a manutenção preventiva, corretiva e preditiva executada na refinaria. Além disso, é responsável pelo planejamento e execução das paradas de manutenção das unidades de processo, intervenções periódicas que visam restabelecer as condições de integridade das unidades. Cabe ainda a esta gerência a execução de todas as compras e contratos de todos os produtos e serviços necessários à refinaria. A Gerência de Manutenção Industrial é portanto a responsável na refinaria, pela execução da estratégia de manter, conforme será abordado no capítulo 4 desta dissertação. Realiza também em menor escala e proporção alguma atividade dentro da estratégia de recapacitação. Recapacitar é entendido como uma alternativa utilizada quando da necessidade de tornar um sistema mais produtivo e eficiente por meio da reabilitação das suas funções originalmente previstas. A atuação da Gerência de Manutenção

Industrial quanto a esta estratégia fica restrita às alterações de menor complexidade e que não impliquem em mudanças de projeto significativas. Já as mudanças de projeto de maior complexidade ficam sob a responsabilidade da Gerência de Engenharia, conforme será visto adiante. Dentro deste conceito, adaptações e atualizações tecnológicas são feitas ao projeto para dar a ele a usabilidade requerida, recuperar-lhe a confiabilidade exigida e garantir-lhe manutenibilidade.

A figura 2.4 representa a estrutura organizacional da Gerência de Manutenção Industrial na qual se observam as 5 Gerências Setoriais da qual a mesma é composta. As atividades de planejamento e execução de paradas ficam a cargo da gerência de Planejamento de Manutenção, e as ações corretivas e preventivas do dia a dia ficam com as demais gerências.

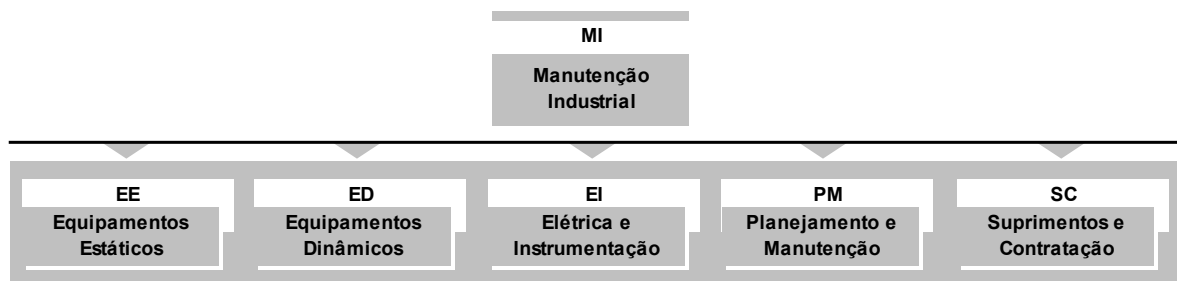


Figura 2.4: Estrutura Organizacional da Gerência de Manutenção Industrial
(Publicação dos Dados anuais RLAM, 2004).

2.4.2 Gerência de Engenharia

As atividades relacionadas com a estratégia de recapacitar ficam normalmente a cargo da Gerência de Engenharia da RLAM. A mesma é responsável pelo estudo e execução das alterações nos equipamentos e sistemas visando torná-los mais eficientes e produtivos por meio de alterações tecnológicas capazes de readequá-los ao cumprimento das suas funções previstas. Para tanto a mesma conta com 3 Coordenadorias: de Projetos, de Obras e de Confiabilidade. Assim sendo, esta gerência está bastante relacionada com o problema tratado nesta dissertação, uma vez que estará dentre as suas atribuições fazer o detalhamento e execução dos serviços definidos para a melhoria na U-36, visando a sua recapacitação. As análises que originarão a execução de serviços para reabilitação de algum sistema em unidades de processo na RLAM são definidas a partir de um estudo preliminar realizado pela gerência de Otimização, conforme será abordado adiante. Esta última realiza assim um estudo preliminar das

referidas alterações necessárias, encaminhando-o para a gerência de Engenharia que se encarregará do seu detalhamento e execução.

A figura 2.5 representa o modelo global de gestão da RLAM, no qual a entrada principal se baseia no Plano Estratégico da Petrobras, no Plano de Negócios do Abastecimento (PNA), e na Missão e Visão da RLAM, os quais são desdobrados na política de gestão, metas e projetos específicos para um determinado período. A confiabilidade, assim como os aspectos de SMS (segurança, meio-ambiente, saúde), os investimentos, etc., tornam-se os pilares para obtenção das referidas metas e projetos. Todos estes aspectos são gerenciados pelo Comitê de Gestão e pelos Subcomitês das gerências da RLAM, conforme representado na figura 2.5, que são constituídos de representantes das diversas gerências da RLAM. No caso da confiabilidade, as ações relacionadas a este item estão ligadas às gerências de Manutenção Industrial, Engenharia, Otimização e Produção.

Gestão da Unidade de Negócio RLAM

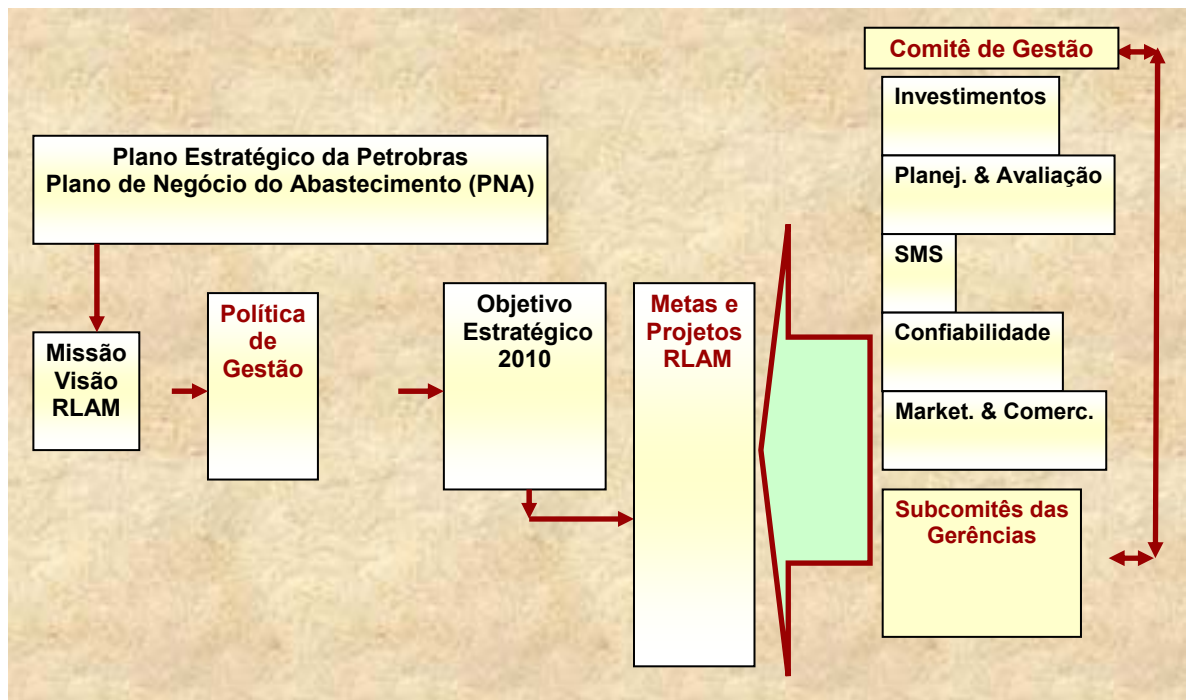


Figura 2.5: Modelo de gestão da RLAM (Publicação dos Dados anuais RLAM, 2004)

2.4.3 Gerência de Otimização

A Gerência de Otimização acompanha, em conjunto com os setores operacionais da refinaria, a evolução de todos os parâmetros operacionais relacionados com o processo, analisando-os e propondo em conjunto com os setores de operação, soluções para os

desvios operacionais apresentados. Cabe assim à Gerência de Otimização a análise quanto aos desvios de funções apresentados pelas unidades, bem como o encaminhamento de estudo preliminar visando a correção dos problemas operacionais analisados. É claro que para a realização deste estudo, são consultados todos os demais setores da refinaria envolvidos com o problema em questão.

No caso da U-36, caberá assim à Gerência de Otimização o levantamento de todos os dados referentes a desvios quanto a parâmetros de processos e funções operacionais, cabendo-lhe ainda a responsabilidade pela elaboração dos projetos preliminares das alterações necessárias bem como encaminhamento dos mesmos à Gerência de Engenharia para detalhamento e execução dos serviços.

2.4.4 Gerência de Produção

A Gerência de Produção engloba as unidades de processo propriamente ditas da refinaria, sendo assim responsável pela operação das unidades de processo, aonde estão alocados tanto o ativo físico (equipamentos) como as equipes de operação destas unidades.

2.4.5. Gerência Setorial de Craqueamento de Resíduos

A Gerência Setorial de Craqueamento de Resíduos é a responsável direta pela operação tanto da U-36 como da U-39 que é a principal fornecedora de gás ácido da U-36. Desta forma é a gerência que responde pelos resultados operacionais imediatos, como por exemplo, a disponibilidade e taxa de falhas. Também quanto à confiabilidade, é a operação da unidade quem primeiro detecta quaisquer desvios em relação à condição e à adequação operacional, que são os dois aspectos do atributo de confiabilidade a serem considerados para a U-36. Todos esses aspectos serão discutidos mais detalhadamente nos capítulos 4 e 6 desta dissertação.

2.5 Comentário final

Este capítulo apresentou a U-36 inserida no contexto da RLAM além de caracterizar a importância desta refinaria para o sistema Petrobras e para o estado da Bahia. Quanto ao problema de baixa disponibilidade apresentado por esta unidade, a apresentação da estrutura organizacional da RLAM possibilita que seja visualizada a contribuição que

cada um destes setores poderá dar na busca da solução do mesmo, além de facilitar a identificação de onde pode ser localizado o pessoal que deverá ser consultado durante a realização das pesquisas para facilitar o entendimento e levantamento dos dados necessários para a solução do problema proposto. A tabela 2.1 resume onde poderão ser obtidas as informações referentes aos parâmetros relacionados com o problema bem como quais gerências estão relacionadas como os mesmos.

Tabela 2.1: Relação entre os tópicos a serem pesquisados na dissertação com as gerências da RLAM.

GERÊNCIA	DISPONIBILIDADE	CONDIÇÃO	ADEQUAÇÃO OPERACIONAL	MANTENABILIDADE	ANÁLISE FUNCIONAL
MANUT. INDUSTRIAL	X	X		X	X
ENGENHARIA					
OTIMIZAÇÃO		X	X		X
PRODUÇÃO	X	X	X	X	X
CRAQUEAMENTO E RESÍDUO CATALÍTICO	X	X	X	X	X

CAPÍTULO 3

O PROCESSO DE RECUPERAÇÃO DE ENXOFRE DA U-36

3.1 Introdução

A primeira unidade de recuperação de enxofre no mundo apareceu ao longo dos anos 1950, tendo sido originada por razões tanto ambientais como comerciais, à medida que se lançava como alternativa à produção de enxofre pelo processo de mineração. Atualmente existem no mundo aproximadamente 550 unidades de recuperação de enxofre sendo a produção mundial atual estimada 120.000 ton/dia (Sulphur, 2005).

A produção mundial tem apresentado um crescimento de 4 a 5% ao ano. A figura 3.1 mostra a projeção da produção de enxofre dos principais países produtores. Pode ser verificado que apesar da demanda se encontrar abaixo da oferta, existe uma forte tendência de recuperação dos preços deste produto.

Deve-se ressaltar ainda que a eliminação do lançamento de gás ácido e dos seus componentes, por meio do processo de recuperação de enxofre a partir dos gases ácidos produzidos em refinarias de petróleo, contribui para diminuição da poluição atmosférica efetuada pelas refinarias de petróleo. Como exemplo, o sulfeto de hidrogênio (H_2S) componente do gás ácido produzido nas refinarias, possui um dos mais altos limites de explosividade dentre os gases industriais (concentrações no ar numa faixa de 3,5 a 45 % o tornam explosivo) possuindo ainda as seguintes características:

- só é menos letal que o ácido cianídrico (HCN);
- em concentrações superiores a 600 ppm leva o ser humano à morte;
- é bastante corrosivo quando combinado com água, atacando os aços carbonos, inox e várias ligas. Acima de 350 °C ataca seriamente o aço-carbono.

Vale ainda ser citado que cada tonelada de enxofre produzido nas unidades de recuperação representam duas toneladas de dióxido de enxofre (SO_2) que deixaram de ser lançadas na atmosfera.

Por outro lado, o enxofre, produto resultante da recuperação nas unidades, é usado em larga escala como matéria-prima de fertilizantes, logo, além dos aspectos ambientais há também fortes aspectos econômicos envolvidos neste processo.

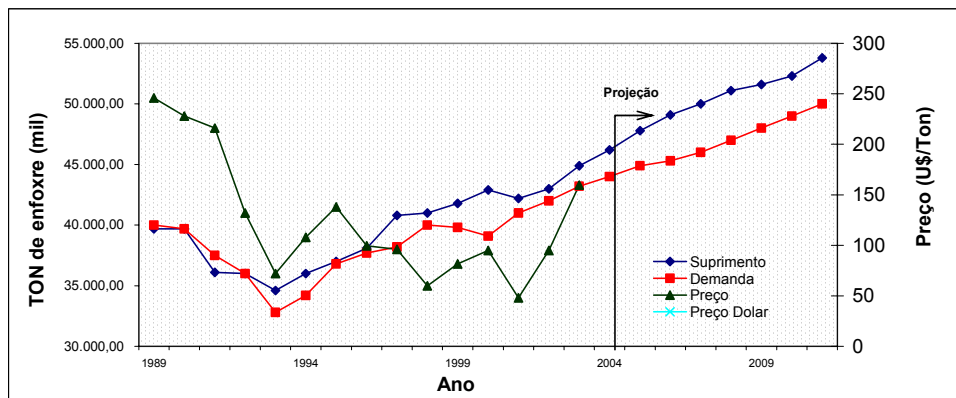


Figura 3.1: Suprimento X Demanda de enxofre no mundo (Sulphur, 2005).

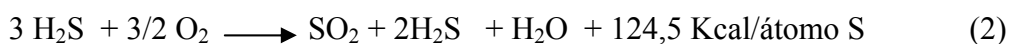
3.2 O Processo Claus de Recuperação de Enxofre

O Processo Claus de recuperação de enxofre foi patenteado em 1884, pelo cientista inglês Carl Friedrich Claus. A reação fundamental deste processo baseia-se na oxidação do sulfeto de hidrogênio (H_2S) conforme representada pela reação 1:



Esta é uma reação que ocorre com catalisador numa faixa de temperatura entre $200^\circ C$ e $350^\circ C$, liberando cerca de 620 KJ (588 BTU) aproximadamente.

O processo Claus engloba na conversão do enxofre as seguintes reações:



A figura 3.2 representa o processo Claus modificado sintetizando as etapas que ocorrem numa unidade de recuperação de enxofre. Pode ser observada a entrada no forno dos insumos H_2S e O_2 provenientes do gás ácido e ar de combustão respectivamente. A partir do aquecimento aí originado, o gás ácido é encaminhado para uma caldeira de recuperação, aonde é gerado vapor de alta pressão. O gás ácido então segue para as etapas de conversão catalítica e condensação de enxofre, no qual são produzidos

enxofre líquido e vapor de baixa pressão. Em seguida, o gás ácido residual segue para a seção de tratamento adicional sendo incinerado a seguir e enviado para a atmosfera.

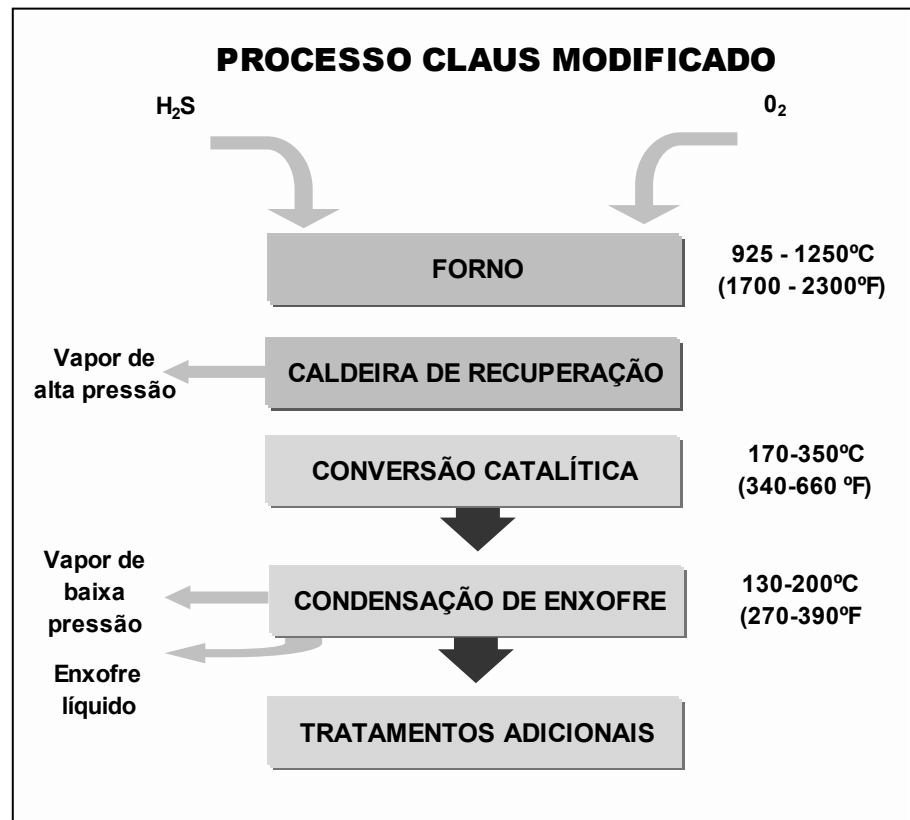


Figura 3.2: Processo Claus modificado (Sulphur, 2005).

A fim de ser melhorada a eficiência de um processo de recuperação de enxofre deve-se tentar atingir segundo Barrow (2001) os seguintes objetivos:

- maximizar a remoção de enxofre o mais cedo possível nas etapas de conversão;
- utilizar 3 estágios de conversão catalítica;
- operar numa faixa de temperatura de 8 a 10 °C superior à temperatura do ponto de orvalho prevista na saída do leito catalítico.

3.3 A Unidade de Recuperação de Enxofre U-36 da RLAM

3.3.1 Descrição da carga da Unidade 36

As informações de projeto indicam que a Unidade 36 foi projetada para o tratamento de 2.826 Nm³/h de gás ácido (capacidade nominal) e produção de 72 ton/dia de enxofre. A flexibilidade operacional tem uma abrangência de 45 a 120 por cento.

Significa que a unidade pode operar com uma capacidade de processamento entre 1.217 Nm^3/h até 3.391 Nm^3/h de gás ácido. As informações de projeto indicam também uma capacidade de recuperação de enxofre da ordem de 97 % (Manual de Operação da U-36, 1997). As correntes de gás ácido para alimentação da U-36, de acordo com os dados de projeto, devem se originar das seguintes unidades de processo da RLAM com as suas respectivas vazões :

1. unidade de desagregamento de água ácida (U-80) com vazão de 386 Nm^3/h ;
2. seção de tratamento de aminas da unidade de craqueamento catalítico da U-6 com vazão de 110 Nm^3/h ;
3. seção de tratamento de aminas da unidade de craqueamento catalítico U-39 com vazão de 2330 Nm^3/h .

Atualmente a U-36 tem operado recebendo gás ácido proveniente apenas da U-39 a uma vazão de 2.300 Nm^3/h . Esta vazão representa aproximadamente 80% da capacidade prevista para a unidade.

Três características importantes da especificação de gás ácido para o processo de recuperação de enxofre são: 1) o teor de hidrocarbonetos (HC); 2) o teor de amônia; 3) a concentração de H_2S .

Barrow (2001) cita que teores de HC fora da especificação do processo podem provocar os seguintes efeitos:

- aumento da demanda de ar;
- aumento da temperatura do forno de reação;
- diminuição da capacidade da planta ;
- possibilidade de contaminação do produto além afetar o catalisador dos reatores.

O mesmo autor cita também que quanto maiores forem as cadeias de hidrocarbonetos presentes, maiores serão as temperaturas e o consumo de energia necessários para reduzir os seus efeitos negativos. Assim, teores de hidrocarbonetos maiores que o percentual previsto no projeto comprometem a qualidade do enxofre quanto às características de coloração (elevada formação de fuligem no produto final) além de danificar os leitos dos reatores.

Os dados de projeto da U-36 indicam o teor máximo de 2% de HC. As correntes de gás ácido originadas nas unidades U-6, não se enquadram dentro dos parâmetros requeridos para a U-36, principalmente, por apresentarem um teor de

hidrocarbonetos bem superior a 2%. Já a corrente originada na U-39 está enquadrada de acordo com o previsto, sendo assim a única que pode ser utilizada segundo este critério.

Quanto à composição de amônia e seus derivados no gás ácido, Randy (2003) estabelece que a presença deste componente acima do especificado traz sérias consequências negativas ao processo, destacando-se :

- aumento da demanda de ar;
- aumento da temperatura do forno de reação;
- redução da capacidade da planta;
- formação de sais nas linhas da planta ao se atingirem temperaturas inferiores a 150 °C.

Os dados de projeto da U-36 admitem um teor de NH_3 no gás ácido de no máximo 0,2%. A U-80 atende a este requisito quanto ao teor de amônia. Entretanto, o gás ácido originado da mesma contém também uma grande quantidade de água dissolvida o que impossibilita a sua utilização na U-36.

A concentração de H_2S é a característica do gás ácido responsável pela eficiência na produção de enxofre nos processos Claus. Quanto maior for a concentração de H_2S no gás ácido, maior será a eficiência deste processo. O gás ácido utilizado nas unidades de recuperação de enxofre é classificado de acordo com os teores de H_2S existentes (Barrow, 2001) conforme a tabela 3.1.

Tabela 3.1: Classificação do gás ácido segundo os teores de H_2S (Barrow, 2001)

Teor de H_2S no gás ácido(%)	Classificação do gás ácido
50 - 100	Rico
20 - 50	Médio
10 - 20	Pobre
Menor que 10	Muito pobre
Menor que 5	Extra pobre

A Tabela 3.2 estabelece a composição média das correntes de gás ácido originadas das unidades U-6 e U-39 de acordo com resultados de análises realizadas no Laboratório da RLAM.

Tabela 3.2: Composição de gás ácido das unidades U-6 e U-39

Composição do Gás Ácido (%)		
Elemento	U-6	U-39
H ₂ S	93,56	39,92
CO	0,11	0,01
CO ₂	1,1	55,11
N ₂	0,47	0,68
O ₂	0,93	0,61
METANO	1,08	1,41
ETANO	0,01	0,01
ETENO	0,08	0,18
PROPENO	2,45	2,04
PROPANO	0,16	0,01
ISO-BUTANO	0,05	0,02

Apesar das concentrações dependerem das cargas de petróleo em utilização nas respectivas unidades, os valores médios encontrados indicam que a corrente de gás ácido da U-6 é classificada como rica enquanto que a da U-39, classificada como média. Entretanto conforme já mencionado, em função do teor de HC da corrente de gás ácido da U-6 estar fora do especificado, a mesma fica assim impedida de ser utilizada na U-36. Por outro lado, a corrente de gás ácido originada da U-80 possui um percentual deste gás da ordem de 91%. Entretanto, como a mesma também possui uma grande quantidade de água dissolvida, o seu uso na U-36 fica impossibilitado. Este teor de água não foi ainda determinado, por falta de uma análise neste sentido, porém é descartado o seu uso na U-36 em função dos efeitos adversos que a presença de água pode provocar no processo desta unidade.

Assim sendo, duas importantes alternativas para melhoria da eficiência operacional da U-36 é proposta: 1) a correção e enquadramento do teor de HC no gás ácido da U-6; 2) a correção da quantidade de água dissolvida da corrente de gás ácido originada da U-80 para possibilitar suas utilizações na U-36.

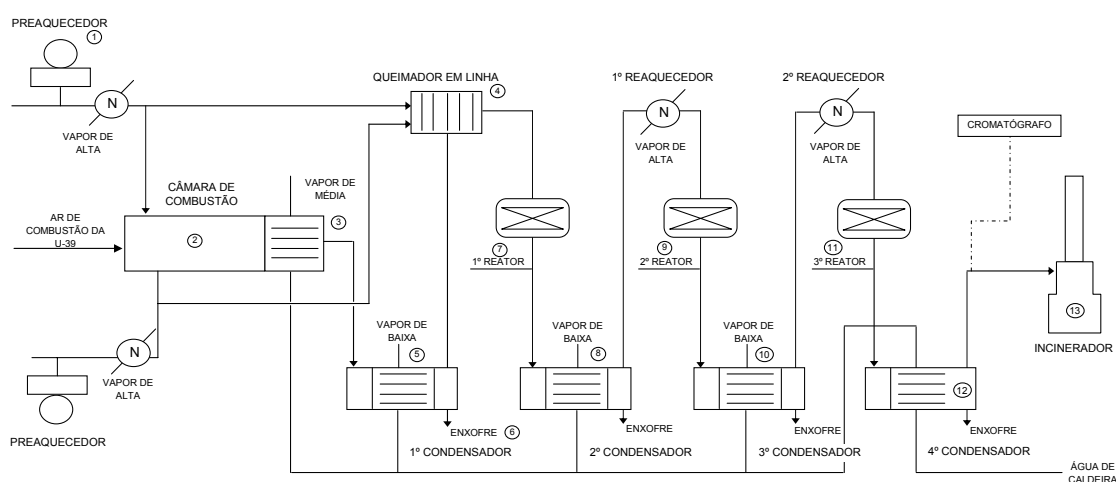
Por outro lado, os dados de projeto indicam uma concentração mínima necessária de H₂S na corrente de gás ácido da U-39 igual a 72 %, bem superior à média real encontrada, conforme pode ser verificado na tabela 3.2, constituindo-se um importante desvio das condições originais de projeto previstas.

3.3.2 Descrição do processo da U-36

Para um melhor entendimento da U-36, apresenta-se um detalhamento do processo de trabalho desta unidade. Do ponto de vista da carga, a unidade requer algumas condições quanto ao gás ácido conforme já comentado no item anterior, principalmente no tocante ao teor de H_2S , teor de hidrocarbonetos (HC) e quantidade de água dissolvida no gás.

Do ponto de vista estrutural, conforme pode ser observado na figura 3.3, a unidade possui um nível de complexidade razoável tanto para a operação quanto para manutenção. O gás ácido derivado de várias unidades que alimentam a unidade de recuperação de enxofre é armazenado inicialmente no tambor de gás ácido F-3601 na entrada da unidade, que não está apresentado na figura 3.3. Já o ar necessário para a combustão é originado exclusivamente da U-39 do seu soprador de ar principal J-3901. O gás ácido é pré-aquecido no pré-aquecedor de gás ácido C-3601 e enviado para o forno de reação (B-3601) onde aproximadamente um terço do H_2S presente no gás ácido é queimado na presença de ar em quantidades estequiométricas. Após esta etapa, o gás ácido é resfriado, gerando vapor de média pressão na Caldeira de Vapor Gasto (GV-3601). Vale salientar a existência de mecanismos de controle neste equipamento, visando a retirada de enxofre líquido nesta etapa. Após deixar a GV-3601, o gás não condensado segue para o primeiro condensador C-3603 em cuja saída ocorre uma separação entre o enxofre líquido e o gás não condensado. Este último a seguir é encaminhado para o forno de pré-aquecimento B-3602 e em seguida para o primeiro conversor de enxofre (D-3601), onde na presença de um catalisador de alumina, continua a reação de formação de enxofre. Após esta etapa, o gás ácido é condensado no segundo condensador de enxofre (C-3604), aonde o enxofre líquido separado do gás ácido restante é enviado ao terceiro recipiente vedado de enxofre F-3607, não representado na figura 3.3. O gás não condensado residual que sai do C-3604 é re-aquecido e enviado ao segundo conversor de enxofre (D-3602) para se continuar a reação de formação de enxofre também na presença de catalisador de alumina. O vapor não condensado saindo do D-3602 é novamente condensado no C-3606 e separado mais uma vez da corrente do gás. Esta corrente é re-aquecida a seguir com vapor de alta pressão para, a partir daí, seguir para o terceiro conversor de enxofre (D-3603), aonde ocorre a última conversão, também em um leito de alumina. Depois disso, o efluente do

gás de saída é resfriado para 132 °C em mais um condensador (C-3608) onde ocorre o pré-aquecimento de toda água de alimentação da caldeira de geração de vapor da unidade e condensação da última fração de enxofre. Neste ponto (saída do C-3608), mantém-se o controle da temperatura de saída do enxofre, pois valores maiores que 140 °C, aumentam a quantidade de enxofre na corrente de gás que segue para ser incinerado, e valores inferiores a 120 graus, podem resultar na formação de enxofre sólido, o que provoca o entupimento das linhas e equipamentos. A fração gasosa não condensada no C-3608 segue a seguir para incineração no forno B-3603.



Legenda

1. C-3601	2. B-3601	3. GV-3601	4. B-3602	5. C-3603	6. C-3603	7. D-3601
8. C-3604	9. D-3602	10. C-3606	11. D-3603	12. C-3608	13. B-3603	

Figura 3.3: Diagrama simplificado do processo de fabricação de enxofre da U-36.

3.4 Caracterização do perigo presente na operação e manutenção das substâncias que contêm enxofre

Neste item serão tratadas algumas características dos produtos processados na U-36, evidenciando-se o sulfeto de hidrogênio (H_2S), o enxofre (S_2) e o dióxido de enxofre (SO_2) devido à relação dos mesmos com o problema tratado nesta dissertação. A partir do melhor entendimento de algumas das suas características, poderão ficar melhor compreendidos alguns dos cuidados operacionais bem como de alguns problemas de manutenção existentes na U-36. As recomendações e observações abaixo listadas foram obtidas do Manual de Operação da U-36 (1997) e contêm algumas das principais características dos produtos citados que influenciam, de certo modo, a condição operacional e a manutenibilidade da U-36, objetos desta dissertação.

- **O sulfito de hidrogênio (H_2S)**

É um gás incolor com cheiro característico, muito desagradável. Ele é altamente tóxico e corrosivo no aço-carbono, especialmente, em situações de altas temperaturas e alta umidade, o que é típico de um ácido inorgânico. Na ausência de água ele não é corrosivo ao aço-carbono. O H_2S é um gás inflamável, queimando-se na presença de ar para formar dióxido de enxofre e água com a liberação de calor. Esta reação se dá de forma violenta resultando em explosões na presença de oxigênio. É necessário, portanto ao se estocar e manipular o sulfito de hidrogênio, evitar o contato do mesmo com todas as fontes de centelhas e/ou quaisquer equipamentos que irradiem calor, a fim de não se proporcionar a sua combustão em presença do ar. A auto-ignição do H_2S com o ar irá ocorrer a uma temperatura de aproximadamente 260°C . O ponto de ebulição é de $-61,8^\circ\text{C}$ e o ponto de fusão é de $-82,9^\circ\text{C}$. A densidade do gás é de 1,19 ($\text{ar}=1$) sendo, portanto mais pesado que o ar, por isto, tende a se acumular em locais baixos, especialmente nas bacias dos selos de enxofre e depósitos de enxofre. A densidade do líquido é de 1,54 e a pressão do vapor é de 8,77 atm ($9,06 \text{ Kg/cm}^2$) a 20°C .

- **Dióxido de enxofre (SO_2)**

O dióxido de enxofre é um gás incolor com uma densidade de 2,2 vezes maior que o ar. É um gás não inflamável, sendo que na presença de neblina ou água esse gás se transforma em ácido sulfuroso e/ou ácido sulfúrico. Este gás irrita o sistema respiratório, podendo em concentrações mais elevadas corroer o tecido humano.

- **Enxofre**

À temperatura e pressão ambientes o enxofre puro é um sólido amarelo vivo e inodoro. Sofre fusão a 120°C resultando num líquido amarelo avermelhado e de baixa viscosidade. Com um maior aquecimento ele se torna mais escuro e menos fluido. A 160°C ele adquire a máxima viscosidade resultando numa transformação estrutural e se comportando como plástico. O enxofre como plástico é reversível ao estado líquido apenas após um longo período de tempo bem superior à possibilidade industrial. Assim sendo, aquecer o enxofre a $160\text{-}170^\circ\text{C}$ resulta em um líquido pseudo-sólido de difícil manuseio e que não pode ser bombeado. É importante por isso que o enxofre seja

mantido a uma temperatura constante de aproximadamente 130-145 °C por meio de um adequado aquecimento com vapor. Já que o calor específico do enxofre é baixo (0,19 Kcal/Kg °C a 90 °C para sólido e 0,25 Kcal/Kg °C a 140 °C para líquido) o mesmo se comporta nestas condições como material isolante. O enxofre líquido é inflamável com ponto de chama de aproximadamente 170 °C. Ele queima no ar formando SO₂ e SO₃. Seu ponto de ebulição é 444 °C. O enxofre líquido não é corrosivo, mas na presença de umidade ele ataca o aço rapidamente.

O sulfito de hidrogênio é solúvel no enxofre líquido, sendo que a solubilidade decresce à medida que a temperatura decresce. Por este motivo o enxofre líquido coletado no depósito de enxofre contém H₂S (aproximadamente 300 ppm) que será em parte liberado à medida que o enxofre resfria. Já a uma temperatura não superior a 160 °C, a auto-ignição do enxofre líquido pode ocorrer quando em contato com o ar. A ignição do enxofre também irá ocorrer quando exposto em área de chama aberta, resultando na formação de SO₂.

Em função das características dos produtos vistas acima, algumas precauções operacionais são necessárias conforme serão vistas nos subitens abaixo a fim de se evitarem problemas operacionais.

3.4.1 Principais barreiras recomendadas para prevenir e evitar explosão de gás

Seguem abaixo alguns cuidados operacionais a serem tomados, visando-se evitar a ocorrência de explosões relacionadas ao sulfito de hidrogênio (H₂S). A menção a estes itens visa procurar esclarecer o entendimento quanto a algumas causas e soluções de problemas ocorridos na U-36:

- a) Antes de se iniciar o processo para acendimento dos queimadores é recomendado que a área ao redor da planta seja testada com um detector para gás inflamável a fim de se confirmar que não existe nenhum gás presente com esta característica.
- b) Durante uma parada prolongada, toda a tubulação de gás ácido e de gás combustível deve ser bloqueada nos seus limites de bateria (limites físicos representativos do início/fim de processamento e da entrada/saída de produtos em uma unidade de processo).
- c) Antes de se tentar acender ou reacender os queimadores de gás combustível no reator térmico, deverá ser realizada a purga deste equipamento. A purga do reator em partidas

frias é feita com o ar. Já em partidas quentes, quando existir enxofre na unidade, a purga deve ser feita utilizando-se nitrogênio.

3.4.2 Medidas de segurança para se evitar queima de enxofre

O enxofre queima exotermicamente em presença do oxigênio, constituindo-se em uma combustão incontrolável. Os seus efeitos para os equipamentos da planta são devastadores, tanto pela alta temperatura gerada, como pela atmosfera corrosiva resultante da combustão. Assim sendo, sempre que houver enxofre na unidade, precauções devem ser tomadas para limitar o seu contato com o oxigênio. Seguem abaixo algumas das precauções necessárias:

- a) Durante os passos de aquecimento da planta no caso da presença de enxofre líquido e quando operando com gás combustível, este último deverá queimar estequiometricamente. Durante o aquecimento da planta, o gás combustível deverá ser analisado para controlar o CO em 0,4% por volume máximo e o O₂ em 0,4 % por volume máximo. Os mesmos deverão ser mantidos dentro destes limites de segurança.
- b) Os equipamentos de processamento e as tubulações não deverão ser abertos para a atmosfera até que o enxofre tenha sido completamente removido e a temperatura esteja abaixo de 150 °C, para se evitar a combustão espontânea na presença de oxigênio.

3.4.3 Medidas de precaução para se evitar solidificação de enxofre

Seguem abaixo algumas das principais medidas necessárias:

- a) Antes de iniciar a combustão com gás ácido e quando algum enxofre estiver presente na planta, todas as partes da planta onde houver fluxo de gás de processo e a possibilidade de presença de enxofre líquido devem ser aquecidas a uma temperatura mínima de 121 °C (temperatura de solidificação do enxofre).
- b) É importante ser mantido em perfeitas condições de operação, os dispositivos existentes na unidade que têm a finalidade de manter a temperatura das tubulações de enxofre de acordo com as condições previstas em projeto. No caso da U-36 estes dispositivos são as linhas de pequeno diâmetro de vapor, instaladas externamente às tubulações de enxofre (também chamadas “traços de vapor”), ou as linhas de maior diâmetro que envolvem as tubulações de enxofre, em cujo interior circula-se vapor.

c) A temperatura no leito de catalisador Claus por meio dos reatores deve ser sempre superior à temperatura do ponto de liquefação do enxofre. A faixa de acréscimo mencionada deve ser 15 a 20⁰C superior à temperatura de liquefação do enxofre. Esta medida visa evitar que se encontrem depósitos de enxofre no catalisador, o que diminuiria a sua capacidade de recuperação de enxofre. Consegue-se a elevação da temperatura do catalisador com o aumento da temperatura do gás nos reatores para eliminação do enxofre líquido.

3.4.4 Medidas de precaução para se evitar corrosão da planta

Seguem abaixo algumas medidas:

- a) A correta eficiência do sistema de aquecimento dos equipamentos e das linhas de processo é muito importante para evitar o risco de corrosão devido à condensação da água. As temperaturas dos mesmos deverão estar assim de acordo com o previsto no projeto da unidade.
- b) Durante o processo de eliminação do enxofre, a combustão do gás combustível deve ser realizada em condições estequiométricas para evitar-se formação de excedentes de oxigênio eliminando-se assim os riscos de queima do enxofre líquido presente na unidade.

3.5 O problema de obstrução de linhas e equipamentos da U-36

Conforme já citado, devido ao fato da U-39 fornecer à U-36 todo o gás ácido bem como o ar de combustão necessários ao processo da U-36, a parada operacional da U-39 leva de imediato à parada também da U-36 devido à falta destes insumos, criando-se assim uma total dependência entre as disponibilidades das duas unidades. Identifica-se que os aspectos abaixo relacionados com o projeto da U-36 e que se refletem de forma decisiva na sua condição de operação, são fatores importantes para determinação da disponibilidade desta planta, tais como: 1) a concentração de H₂S abaixo da especificada existente na corrente de gás ácido originada da U-39; 2) o fato de não poder se contar até o momento com as correntes de gás ácido originadas na U-80, provocando assim um desequilíbrio quanto ao balanço energético das reações térmicas necessárias para a recuperação do enxofre da unidade. Conforme será visto, os aspectos

citados contribuem para a ocorrência de um dos problema existentes na U-36, ou seja, a obstrução das linhas e equipamentos com enxofre.

Outro fator também já citado e relacionado tanto com o problema de obstrução das linhas como também com a questão de baixa manutenibilidade apresentada pela U-36 é o fato da mesma não dispor de um soprador de ar de combustão exclusivo, fazendo com que a U-36 dependa completamente do fornecimento de ar de combustão da U-39, ocasionando deste modo a paralisação deste fluxo de ar e também da U-36 propriamente dita, todas as vezes em que ocorre uma parada operacional na U-39. Este fato acarreta não só a obstrução das linhas, como também prejudica a manutenibilidade da U-36 em decorrência da dificuldade em se realizar a limpeza necessária no interior das linhas e equipamentos da U-36 sempre antes que a mesma seja paralisada. Isto se deve à solidificação dos depósitos de enxofre que ocorre nestes casos, provocada pelo resfriamento não controlado deste produto em decorrência da falta do ar de combustão aquecido que deveria ser circulado no interior das linhas e equipamentos antes da paralisação da U-36. A presença destes depósitos solidificados no interior dos mesmos além de contribuir para a aceleração do seu processo corrosivo, retarda de modo significativo o retorno operacional da U-36 uma vez que para se reiniciar o processo operacional da unidade, é necessário que estes depósitos sejam removidos, o que só é obtido a partir da abertura dos equipamentos e trechos de linhas obstruídos. Em análises dos históricos de manutenção e operação desta unidade, fica evidenciado que os grandes períodos de paralisação da U-36 foram originados de uma parada da U-39, tendo sido retardado o seu retorno operacional devido principalmente à necessidade de realização de serviços para possibilitar a limpeza, e a recuperação adicional dos equipamentos devido à corrosão.

3.6 Histórico levantado quanto à evolução dos problemas da U-36

A U-36 após a sua partida apresentou problemas de obstrução de enxofre durante a operação da unidade, decorrentes principalmente do desequilíbrio entre a vazão e teor de H_2S presentes na corrente de gás ácido fornecido pela U-39. Este referido desvio fazia com que se atingissem baixas temperaturas na saída dos condensadores, acarretando a solidificação do enxofre e obstrução no interior destes equipamentos. Após estudo realizado pela equipe de projeto do Cenpes da Petrobras, que confirmou o desvio citado acima, foi identificado que alguns sistemas da U-36 se

encontravam de alguma maneira super-dimensionados em relação às condições de operação reais encontradas.

Foi proposto assim o plugueamento parcial dos condensadores e caldeira de recuperação de calor (isolamento de alguns tubos a partir da instalação de plugs em ambas as extremidades dos mesmos) com o propósito de se aumentar a velocidade de fluxo no interior destes equipamentos, o que acarretaria o aumento das temperaturas de gás ácido na saída dos condensadores. Foi identificado também no contato mantido com o pessoal de operação, que tais medidas obtiveram êxito quanto ao aumento da temperatura de saída dos condensadores, evitando-se deste modo a solidificação do enxofre durante a operação da unidade. Entretanto, os problemas de baixa disponibilidade da unidade continuavam, uma vez que todas as vezes que a U-39 (única fornecedora de gás ácido para a U-36) saía de operação, provocando também a paralisação da U-36, o retorno à operação desta última se tornava bastante demorado, o que continuava a comprometer a sua disponibilidade. A dependência existente com a U-39 para a operação da U-36 bem como a difícil manutenibilidade apresentada por esta última apareceram desta forma como fatores também relacionados com o baixo desempenho apresentado pela U-36, sendo assim também considerados nesta pesquisa.

3.7 Comentário Final

A Unidade de Recuperação de Enxofre da RLAM (U-36) tem apresentado uma disponibilidade muito menor daquela prevista desde o início da sua operação, atingindo-se um valor médio de 19% no período considerado de novembro de 2001 até junho de 2005 conforme será demonstrado no capítulo 6. Analisando-se os problemas mais significativos relacionados com esta baixa disponibilidade, identifica-se que os aspectos relacionados com o projeto da U-36 e que se refletem de forma decisiva na sua condição de operação, são fatores importantes para a determinação da referida disponibilidade. Dentre estes aspectos, aqueles que merecerão uma análise nesta dissertação quanto as suas respectivas influências nos resultados de disponibilidade são os seguintes:

- 1) A concentração de H_2S da corrente de gás ácido originada da U-39 ser inferior à especificada no projeto da unidade.
- 2) O fato de não poder se utilizar, até o momento, as correntes de gás ácido originadas na U-80, provocando assim um desequilíbrio quanto ao balanço energético das reações térmicas necessárias para a recuperação do enxofre da

unidade, além de se gerar uma dependência entre a operação da U-36 em relação à da U-39.

- 3) A não existência no projeto da U-36 de um soprador de ar para fornecimento de ar de combustão pertencente a esta própria unidade, levando a mesma a depender para fornecimento deste insumo de outra unidade, o que provoca a falta de ar de combustão durante a parada operacional da unidade da qual o soprador de ar faz parte, no caso a U-39. Esta interrupção que acarreta também na parada da U-36, faz com que também não seja realizada a limpeza do interior das linhas e equipamentos da U-36 após a sua paralisação, feita com a sopragem de ar de combustão através dos mesmos, etapa fundamental a ser realizada numa unidade de recuperação de enxofre. Como não é cumprida esta etapa, ocorre a formação de depósitos de enxofre solidificados no seus interiores com o resfriamento da unidade. Estes depósitos aceleram o processo de corrosão nestes equipamentos durante o período de paralisação da U-36, além de retardarem o retorno operacional da mesma devido à necessidade de remoção destes depósitos para possibilitar o fluxo livre de gás ácido durante a sua operação.

A proposta para solução destes problemas estará baseada em uma proposição de revisão da etapa do projeto informacional para esta unidade. A metodologia que será utilizada para esta finalidade será descrita nos capítulos posteriores. Estas medidas terão o objetivo de melhorar a disponibilidade operacional da U-36, adequando-a aos valores previstos pela RLAM.

CAPÍTULO 4

FUNDAMENTOS DO ATRIBUTO DE DISPONIBILIDADE

4.1 Introdução

Neste capítulo será apresentado o atributo de disponibilidade e a sua correlação com o atributo de confiabilidade e manutenibilidade, bem como as suas principais ferramentas. Será ainda apresentada uma metodologia que possibilita relacionar a disponibilidade e manutenibilidade de um sistema com as alternativas gerenciais de manutenção de uma unidade industrial, adaptando a sua utilização para a unidade de recuperação de enxofre.

4.2 Confiabilidade

Conceitos como confiança no equipamento, durabilidade, capacidade de um equipamento em operar sem falhas está relacionado com a idéia de confiabilidade. Confiabilidade é definida como a probabilidade de um equipamento, componente ou sistema cumprir a sua função com sucesso, por um período de tempo previsto, sob condições de operação especificadas (NBR5462/94).

O inverso de confiabilidade de uma maneira generalista seria a não confiabilidade que está diretamente associada com a falha, que seria a impossibilidade de um sistema ou componente cumprir com sua função da forma em que é requerida. Em outras palavras, a confiabilidade é definida como a probabilidade de um equipamento ou sistema operar com sucesso por um período de tempo especificado e sob condições operacionais também especificadas. Esta definição indica explicitamente quatro aspectos importantes no conceito da confiabilidade (Dias, 2003) que são:

- a sua natureza probabilística;
- a sua dependência temporal;
- a necessidade do estabelecimento de um padrão, no que se constitua sucesso ou não do sistema;

- a necessidade de especificações das condições de operação (ou de uso) do equipamento.

O fato de ser definida como uma probabilidade significa que a confiabilidade pode ser expressa quantitativamente, assumindo valores entre “0” (zero) e “1” (um). A utilização deste conceito probabilístico na prática da engenharia da confiabilidade implica no conhecimento explícito, tanto na parte do projetista como na parte da gerência, de que é impossível projetar-se um sistema inteiramente à prova de falhas.

4.3 A FMEA

Neste item será realizada uma revisão bibliográfica sobre a ferramenta FMEA, (Failure Mode and Effect Analysis). Serão abordados os tópicos relativos à descrição, definição da equipe responsável pelo seu desenvolvimento, procedimentos e etapas necessárias para implantação, aplicações (projetos, processos, serviços), quando executar e formulários apropriados para aplicação da FMEA.

A identificação dos modos de falha e a apuração dos seus efeitos associados são obtidos com o uso da ferramenta FMEA.

Além de suas aplicações como ferramenta que visa identificar e antecipar causas e efeitos dos modos de falha de um sistema, resultando em ações corretivas classificadas segundo a sua criticidade, com a conseqüente melhoria dos planos de manutenção das empresas e da confiabilidade das mesmas, a FMEA também pode ser usada como ferramenta para as seguintes aplicações:

- como ferramenta de comunicação para identificar a importância das características do produto;
- análise das árvores de falha (FTA) ;
- utilização em conjunto com outras ferramentas como QFD (Quality Facilities Deployment) (Souza, 2000), FCM (Mapas Cognitivos Fuzzy) (Peláez, 1996);
- meio para identificação dos testes necessários e requeridos para certificação de um projeto (Lafraia, 2001) ;
- sistematização da documentação de projetos.

Um dos fatores que dificulta a utilização desta ferramenta é o longo tempo requerido para sua completa realização. Entretanto, o desenvolvimento dos computadores e softwares específicos tem favorecido o desenvolvimento de FMEA's

automatizados, com desenvolvimento de aplicações que auxiliam atividades como preenchimento de formulários, gerenciamento de reuniões e o cadastro de falhas. Huang et al. (1999) apresentam um protótipo de FMEA automatizado com suporte em internet, que possibilita a participação em FMEA's na Web, mesmo que os participantes estejam fisicamente em diversas partes do mundo. Há uma quantidade importante de publicação sobre FMEA, que tratam das definições, recomendações e cuidados com a aplicação. Stamatis (1995), Sakurada (2001), Palady (1997) por exemplo, abordam detalhadamente os aspectos citados a respeito do assunto. Em face disto, este autor seguirá o conhecimento já existente na literatura para aplicação do FMEA no processo de melhoria da disponibilidade operacional da U-36 destacando apenas alguns pontos necessários a um melhor entendimento da sua aplicação neste caso.

4.3.1 FMECA

Assim como a FMEA, o termo FMECA tem origem da expressão em inglês “Failure Mode Effect and Criticality Analysis” o que pode ser traduzido como Análise dos Modos de Falha Efeitos e Criticidade. A expressão “criticidade” que é acrescentada à definição de FMECA em relação à FMEA é uma combinação de duas outras variáveis: ocorrência e severidade. Resumindo-se:

$$\text{FMECA} = \text{FMEA} + \text{C} \quad (4.1)$$

onde C= Criticidade = Ocorrência x Severidade x Probabilidade de detecção (Lafraia, 2001).

O índice de ocorrência é usado para avaliar as chances (probabilidade) da falha ocorrer. A probabilidade de detecção indica a probabilidade em que determinado modo de falha pode ser detectado. Já a severidade indica a gravidade provocada pelos efeitos provenientes do modo de falha analisado. As tabelas 4.1, 4.2, e 4.3 mostram os valores tabelados para valoração da criticidade através dos valores de cada um dos fatores que a compõem (ocorrência, severidade, probabilidade). Além das apresentadas, há outras formas de potencializar os índices. Os mesmos podem ser definidos no interior da organização de acordo com o que a equipe de FMECA achar conveniente para se integrar à nomenclatura da empresa.

Tabela 4.1: Probabilidade de ocorrência (BEN-DAYA e RAOUF,1996)

Probabilidade de ocorrência	Chances de ocorrência	Escore
Remota	0	1
Baixa	1/20.000	2
	1/10.000	3
Moderada	1/ 2.000	4
	1/ 1.000	5
	1/ 200	6
Alta	1/ 100	7
	1/ 20	8
Muito alta	1/10	9
	1/ 2	10

Tabela 4.2: Severidade dos efeitos (BEN-DAYA e RAOUF,1996)

Severidade	Escore
O cliente provavelmente não tomará conhecimento	1
Leve aborrecimento	2 – 3
Insatisfação do cliente	4 – 6
Alto grau de insatisfação	7 – 8
Atinge as normas de segurança	9 - 10

Tabela 4.3: Índice de detecção das falhas (BEN-DAYA e RAOUF,1996)

Probabilidade de não detectar a falha	Probabilidade (%) de um defeito individual alcançar o cliente	Escore
Remota	0 - 5	1
Baixa	6 – 15	2
	16 - 25	3
Moderada	26 – 35	4
	36 – 45	5
	46 - 55	6
Alta	56 – 65	7
	66 - 75	8
Muito alta	76 – 85	9
	86 - 100	10

Assim sendo, na FMECA se calcula através dos valores obtidos nas tabelas 4.1 a 4.3 o Número de Prioridade de Risco (NPR) obtido pela expressão:

$$\text{NPR} = \text{Ocorrência} \times \text{Severidade} \times \text{Detecção} \quad (4.2)$$

Vale-se ressaltar que o NPR é associado ao modo de falha dos eventos, sendo assim algumas vezes associado às causas do modo de falha. É o número que vai indicar a prioridade de ação de manutenção sobre os equipamentos, definindo inclusive a forma de manutenção: preventiva, preditiva ou corretiva.

4.3.2 Informações a serem trabalhadas durante a realização da FMEA/FMECA

Em função dos objetivos previstos para estas ferramentas, os registros devem abranger as seguintes informações:

- 1) Identificação do sistema: Identifica o nome do sistema ou título de identificação do FMEA.
- 2) Participantes: Nomes das pessoas que constituem a equipe da FMEA e participam das reuniões.
- 3) Página e datas: Número da página e data de ocorrência da reunião;
- 4) Componente: Nomes dos componentes do sistema analisado.
- 5) Funções: Descreve a função, meta ou propósito do componente analisado. Para facilitar o entendimento, a mesma deve ser escrita de modo claro, objetivo e conciso.
- 6) Modo potencial da falha: Neste campo devem ser identificados o problema, o modo de falha, a preocupação, a oportunidade de melhoria referentes ao sistema analisado. Este item está principalmente relacionado com a perda de função do sistema (falha específica). Pode assim existir mais de uma falha para cada função.
- 7) Efeitos potenciais da falha: São conseqüências (efeitos) provocadas pelos modos de falha devendo ser descritos em função do que os usuários ou clientes podem perceber ou sentir. As conseqüências podem ser para o sistema, produto, cliente ou leis governamentais.
- 8) Severidade do efeito: Índice que representa a gravidade da conseqüência de um determinado efeito. É sempre aplicado sobre o efeito do modo de falha, sendo tanto maior o índice quanto mais grave e crítico for a sua conseqüência. Pode assumir valores de 1 a 10 conforme tabela 4.2.
- 9) Causas potenciais da falha: É a causa geradora do modo de falha. Pode estar no componente analisado, nos componentes vizinhos ou no ambiente.
- 10) Ocorrência: Índice que corresponde à quantidade estimada de falhas que poderiam ocorrer. Deve ser baseado na causa ou no modo de falha. Pode ser reduzido mediante melhorias nas especificações de engenharia e/ou nos requisitos do processo, no sentido de se prevenirem as causas e se reduzirem às freqüências de ocorrências das mesmas.
- 11) Controles atuais: Neste campo devem ser listados os métodos (procedimento), teste, revisão de projeto, etc. que serão usados a fim de identificar e eliminar as

falhas antes que estas atinjam os clientes do sistema analisado (tanto internos quanto externos).

- 12) Detecção: É a probabilidade de que os sistemas de controle detectem a falha (causa ou modo de falha) antes que esta atinja os clientes (internos ou externos). Este índice é associado a cada um dos controles atuais (item 11 acima), sendo-lhes atribuídos valores de 1 a 10, onde o valor 1 representa a maior probabilidade de detecção. O índice de detecção pode ainda ser reduzido através da introdução de melhorias em técnicas de avaliação de projeto/processo, aumento do número de amostras, etc.
- 13) Número de prioridade de risco (NPR): Este índice é resultante da multiplicação dos índices de ocorrência, de severidade e de detecção. Este valor define a prioridade da falha, sendo utilizada portanto na classificação e ordenação das mesmas quanto à importância relativa às deficiências do sistema.
- 14) Ações recomendadas: Ações propostas pelo grupo que compõe a FMEA, que visam obter a redução dos índices de severidade, ocorrência e detecção;
- 15) Responsabilidade e datas de conclusão limites: Enumera os responsáveis pela execução das ações recomendadas com as respectivas datas para conclusão das mesmas.
- 16) Ações tomadas: Neste campo devem ser listadas as ações efetivamente realizadas, comparando-as com as ações originalmente recomendadas (item 14) bem como verificando-se a efetividade das mesmas. É o acompanhamento dos resultados das ações e da sua efetividade, devendo-se definir quem fará este acompanhamento.
- 17) Número de prioridade de risco revisado. Após a efetiva execução das tarefas recomendadas, devem ser reavaliadas pela equipe da FMEA/FMECA a severidade, ocorrência e detecção das falhas, visando-se uma reavaliação dos resultados obtidos bem como uma reordenação das falhas. Estas reavaliações devem ser realizadas pela equipe até se decidir que todas as informações relevantes foram consideradas. Vale-se também salientar que numa FMECA quando não se têm definidos os índices de ocorrência de falha, deve-se recorrer a produtos similares ou se realizar experiências com protótipos visando-se a obtenção dos mesmos.

4.3.3 Quando se iniciar uma FMEA /FMECA

A FMEA/FMECA como ferramenta de confiabilidade para análise dos modos de falha e de seus efeitos, pode ser aplicada tanto na fase inicial de projeto de um produto ou já durante a etapa de sua efetiva aplicação. No primeiro caso, visa identificar as potenciais ocorrências de falhas com base nas informações de projeto existentes, a fim de efetuar as correções necessárias, obtendo-se reduções no custo do produto que irão se refletir ao longo de toda a sua vida (esta etapa é a mais adequada para obtenção de tal redução de custos conforme será abordado no capítulo VI). Já durante a etapa da efetiva aplicação do produto, a aplicação da FMEA visa realizar a análise das falhas com base nos problemas reais verificados.

No presente caso desta dissertação, a aplicação da FMEA/FMECA visa fornecer subsídios a partir da análise dos modos de falha e efeitos ocorridos (relacionados ao problema de disponibilidade apresentado pela U-36), para obtenção da lista de especificações e requisitos necessários à etapa do projeto informacional, visando-se a realização do reprojeto proposto para esta unidade com vistas à melhoria da sua disponibilidade.

4.3.4 A Equipe participante de uma FMEA

A FMEA é uma ferramenta em cuja essência está implícita a necessidade de existência de um trabalho em grupo (Stamatis,1995; Sakurada, 2001), utilizando-se de experiências individuais na construção de um objetivo comum. Fica ainda evidente que para obtenção dos resultados esperados com a utilização da FMEA, é fundamental a existência de liderança na condução do processo, bem como de conhecimentos específicos por parte dos participantes referentes aos assuntos a serem tratados.

Quanto ao estabelecimento do número de participantes, não existe uma regra pré-determinada sendo entretanto consenso geral que uma equipe variando de cinco a nove membros garante uma boa formação à equipe, aliado também à necessidade dentre os membros da presença de engenheiros de projeto e processo.

Palady (1997) recomenda que deva ser designado dentre os membros, responsáveis específicos quanto à duração, orçamento e eficácia da FMEA. Palady (1997) ainda reforça que a estrutura estabelecida para as FMEA's deve sempre

privilegiar e estabelecer o princípio de realização de um trabalho em equipe. A equipe deve ser multidisciplinar de modo que haja representantes com conhecimento e experiência em todas as áreas requeridas àquele estudo específico.

Stamatis (1995) salienta a importância de se obter o comprometimento de todos com as decisões alcançadas, mesmo em não se obtendo cem por cento de concordância de todos os membros em relação às referidas idéias. Para obtenção dos resultados desejáveis a um trabalho em equipe os membros de uma FMEA devem possuir as seguintes características segundo Stamatis:

- ser receptivo a novas idéias;
- ouvir atentamente pontos de vistas diferentes ;
- verificar e descobrir as razões das demais opiniões;
- possuir uma postura para contribuir e não apenas de defender as suas próprias opiniões;

Quanto ao encaminhamento e operacionalização das reuniões das FMEA's, alguns cuidados devem ser tomados visando-se obter uma maior eficiência dos trabalhos segundo Stamatis (1995):

- definir-se claramente o propósito da reunião;
- não realizar reuniões apenas com o objetivo de cumprir tabelas, evitando-se repetição de informações antigas nas mesmas;
- evitar o tratamento nas reuniões, de assuntos muito enfadonhos buscando-se sempre dinamizar os trabalhos e reuniões ;
- a postura do líder não deverá reprimir os demais membros, devendo-se conciliar objetividade e respeito às todas as opiniões colocadas;
- grupo constituído por membros multidisciplinares, tendo cada membro um profundo grau de conhecimento em sua área de atuação;
- evitar-se a definição de tarefas superficialmente.

Stamatis (1995) salienta ainda a necessidade de que os membros da equipe devem conhecer os aspectos humanos relacionados com os problemas analisados, como por exemplo, o conhecimento do comportamento dos membros do grupo de pessoas envolvidas com a situação, assim como conhecer o contexto da situação investigada no meio aonde se analisa o problema. Reforça ainda a necessidade de criação de um sentimento coletivo em que todos os membros estejam dispostos a contribuir. As

equipes multidisciplinares devem fazer uso de ferramentas como o FTA (árvore de falhas), “brainstorming” e QFD.

Faz-se necessário por último, como regra para um bom desempenho de uma FMEA, que o coordenador tenha conhecimento e experiência quanto a ferramenta FMEA, bem como que todos os membros conheçam as definições e principais conceitos envolvidos com esta ferramenta, devendo-se caso haja necessidade ser providenciado um treinamento preliminar para nivelamento destes conceitos entre os membros da equipe.

4.3.5 Principais etapas para execução da FMEA/FMECA

Dentre os procedimentos para execução da FMEA/FMECA definido pelos autores Stamatis (1995), Palady (1997) e Kume (1996) pode-se estabelecer a seguinte sequência de etapas como a mais efetiva e completa para realização de uma FMEA:

- 1) seleção da equipe;
- 2) definição do sistema e componentes a serem analisados;
- 3) estabelecimento do diagrama funcional de blocos e ou fluxogramas de processo;
- 4) coleta das informações dos componentes ;
- 5) realização de “brainstorm” sobre os problemas e suas causas;
- 6) revisão das especificações e documentos de necessários para análise;
- 7) identificação dos modos de falha;
- 8) identificação dos efeitos;
- 9) cálculo do NPR (Número de prioridade de risco) em se tratando de FMECA;
- 10) priorização das falhas para proposição de soluções em função do NPR calculado;
- 11) identificação das causas para os modos de falha a serem analisados;
- 12) proposição das soluções e ações corretivas necessárias;
- 13) criação e/ou identificação dos controles necessários ao acompanhamento dos resultados das ações e soluções propostas;
- 14) confirmar implementação das ações corretivas e reavaliar a situação;
- 15) reavaliação dos NPR's obtidos após determinado período, refazendo-se as etapas descritas acima, a partir da de número 6.

4.4 Um modelo de gerenciamento de manutenção centrado em disponibilidade

A disponibilidade é definida como a capacidade de um item estar em condições de executar certa função em um dado instante ou durante um intervalo de tempo determinado, levando-se em conta os aspectos combinados de suas confiabilidade, manutenibilidade e suporte à manutenção, supondo que os recursos externos requeridos estejam assegurados (NBR 5462, 1994).

$$D = (\text{período de tempo disponível}) / (\text{período de tempo sob observação}) \quad (4.3)$$

onde:

D: Disponibilidade.

Ou ainda com base em O'Connor (1991) e Blanchard e Fabrycky (1990) a disponibilidade é definida pela expressão da equação 4.4.

$$D = (\text{MTBF}) / (\text{MTBF} + \text{MTTR}) \quad (4.4)$$

onde:

D: Disponibilidade;

MTBF: Tempo médio entre falhas;

MTTR: Tempo médio total de reparo.

O modelo de gerenciamento de manutenção centrado em disponibilidade permite conforme será visto adiante, estabelecer uma relação entre a disponibilidade e as alternativas gerenciais da manutenção definidas a seguir neste capítulo.

A figura 4.1 representa um diagrama geral do gerenciamento proposto de manutenção centrado em disponibilidade. A escolha da disponibilidade como variável considerada para controle é devido ao fato do seu resultado poder ser também relacionado a fatores de confiabilidade e manutenibilidade.

As definições das estratégias de manutenção (manter, modernizar, redesenvolver e desativar) aqui formuladas foram desenvolvidas para serem aplicadas como auxílio à decisão de modernizar sistemas hidro-geradores de usinas hidroelétricas (Santos, 1999), sendo adaptadas para o presente caso, visando também auxiliarem na tomada de decisão quanto ao reprojeto da U-36. Ainda segundo Santos (1999):

- Manter: Alternativa gerencial que estabelece uma estratégia que consiste em procurar

assegurar que o sistema considerado opere em conformidade com as condições previstas no seu projeto original.

- Modernizar: Estabelece uma estratégia em que o sistema considerado possa se tornar mais produtivo e eficiente, através de ações de reabilitação, atualizações tecnológicas e, onde aplicável, elevação da capacidade nominal de componentes que apresentem comprometimento nos seus desempenhos.
- Redesenvolver: Estabelece uma estratégia que envolve a implantação de um novo empreendimento, associado às facilidades de expandir ou substituir um projeto antigo.
- Desativar: Envolve as possibilidades de retirada do sistema considerado de serviço, objetivando ações que previnam custos futuros de manutenção muito elevados e/ou por decisão do poder regulamentador.

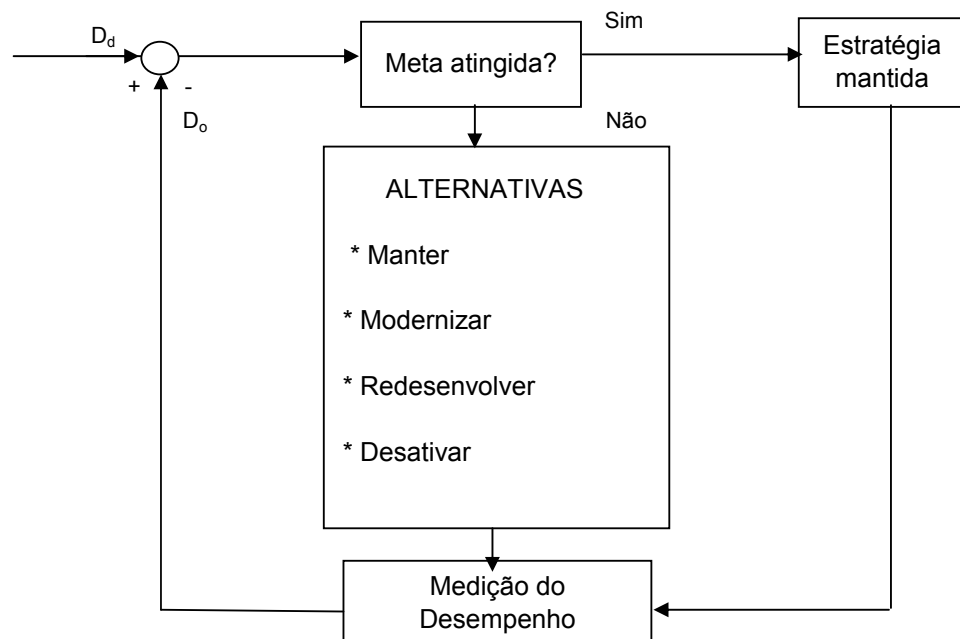


Figura 4.1: Diagrama esquemático do gerenciamento de manutenção centrado em disponibilidade (Santos, 1999).

Este modelo baseia-se no uso da ferramenta PDCA da gestão de rotinas de processo originado com a qualidade total composto das etapas: planejamento (Plan), execução (“Do”), verificação (“Check”) e atuação corretiva (“Action”) cujas iniciais em

inglês deram origem ao nome da referida ferramenta. (Falconi, 1989). A medição de desempenho se dará por meio do atributo de disponibilidade, também devido ao fato da mesma poder ser associada com o “FOI” (Fator Operacional Interno), que se constitui num indicador utilizado para as unidades de processo da RLAM, que representa a disponibilidade operacional de uma dada unidade de processo a uma carga padrão estabelecida, conforme já definido no capítulo 3 desta dissertação. O diagrama apresentado na figura 4.1 procura ressaltar que a estratégia gerencial é mantida desde que a disponibilidade obtida " D_o ", na medição de desempenho, apresente um resultado melhor (maior) ou igual à disponibilidade desejada " D_d ". Caso isto não ocorra, deve-se então, buscar uma alternativa gerencial dentro do elenco apresentado no bloco denominado de alternativas de gerenciamento de manutenção.

A figura 4.2 estabelece uma correlação entre Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade (Dias,1996).

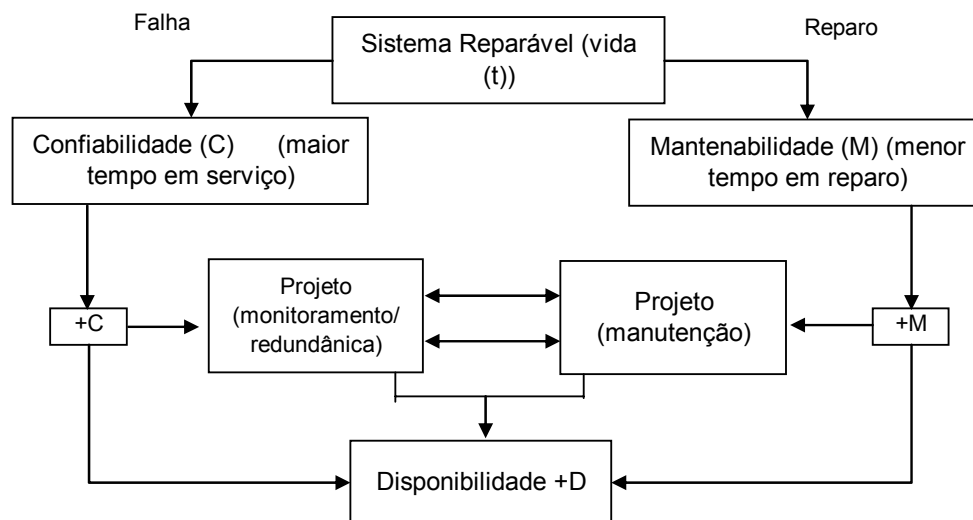


Figura 4.2: Correlação existente entre Disponibilidade, Confiabilidade e Manutenibilidade (Dias,1996).

4.4.1 Considerações adicionais para alteração da estratégia de manutenção

No caso de uma necessidade de redefinição de alternativas gerenciais de manutenção deve-se ainda considerar os seguintes conteúdos como auxiliares destas análises (Dias,1999) :

- a) Histórico do Equipamento/Sistema: flexibilidade operacional, rendimento, períodos de tempo (MTTR, MTBF).
- b) Fatores Econômicos: situação econômica da empresa, custos de operação e manutenção, atendimento ao crescimento do mercado/sistema.
- c) Condicionantes do Sistema Consumidor: elevado índice de disponibilidade, respeito ao meio ambiente.
- d) Estado da arte: ganhos em rendimento, projeto e materiais com características e recursos mais avançados.

A inter-relação dos fatores citados permite a obtenção de uma visão mais abrangente para possibilitar e embasar a análise da alternativa de manutenção a ser adotada, no caso da disponibilidade (“FOI” no caso da U-36) se encontrar abaixo do valor especificado. A figura 4.3 representa o fluxo do gerenciamento centrado em disponibilidade após a incorporação destas visões ao processo. No caso da U-36 o valor estabelecido pela RLAM para o FOI é de 90 %.

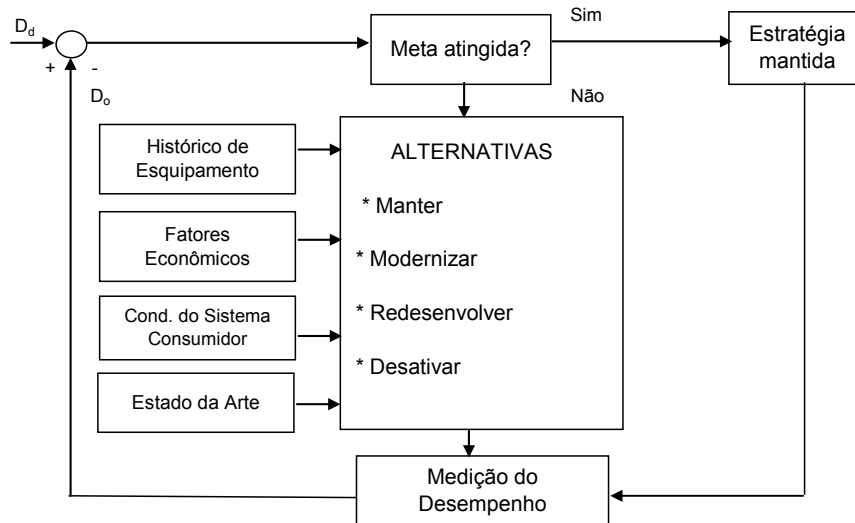


Figura 4.3 : Sistema de gerenciamento de manutenção centrado em disponibilidade (Santos, 1999).

4.5 Modelo confiabilístico da U-36

O processo de produção de enxofre a partir da recuperação de gás ácido da U-36 conforme já demonstrado no capítulo 3 desta dissertação, apresenta um fluxograma de processo que permite representar a U-36 como um sistema composto de componentes em série para efeito de análise do seu modelo de confiabilidade.

A figura 4.4 representa um sistema composto de equipamentos em série. Dias (2003) estabelece que a confiabilidade de um sistema assim disposto pode ser estabelecida de acordo com a equação 4.5, na qual a confiabilidade pode ser representada pelo produtório das confiabilidades individuais de cada componente que compõe o referido sistema.

$$R_{CRi} = \prod_{i=1}^n R_{CEi1} \cdot R_{CEi2} \dots R_{CEi i} \dots R_{CEin} \quad (4.5)$$

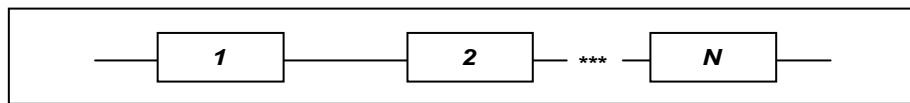


Figura 4.4: Representação de um sistema composto em série.

De acordo com a referida equação, pode-se deduzir que quando as confiabilidades dos componentes de um sistema em série forem inferiores à unidade, a confiabilidade global do sistema será sempre inferior à confiabilidade do seu componente mais fraco.

No presente caso da U-36, fica assim evidente a fragilidade da concepção no tocante à confiabilidade da referida unidade, onde esta configuração de processo em série e a inexistência de equipamentos reservas dos seus sistemas principais, acarretam a paralisação total da unidade sempre que houver a paralisação de quaisquer destes equipamentos dispostos em série. Fica também claro a importância de se identificar os componentes ou sistemas responsáveis pela baixa disponibilidade apresentada por esta unidade, a fim de se implementarem ações que visem corrigir individualmente a confiabilidade dos referidos sistemas ou componentes, o que refletirá na melhoria da confiabilidade, e em consequência da disponibilidade desta unidade.

4.6 Considerações finais

Este capítulo apresentou uma revisão bibliográfica dos conceitos de disponibilidade, confiabilidade bem como da ferramenta FMEA que será utilizada nesta dissertação.

A FMEA poderá ser utilizada principalmente com o objetivo de identificar e antecipar causas e efeitos dos modos de falha levantados da Unidade 36, permitindo-se assim criar ações corretivas classificadas segundo a sua criticidade, melhorando conseqüentemente os planos de manutenção existentes. Poderá ainda apontar aqueles pontos prioritários aonde deverão ser realizadas as revisões do projeto informacional, obtendo-se desta forma uma melhor confiabilidade operacional da Unidade 36 da RLAM.

Da teoria vista até aqui sobre as ferramentas de confiabilidade, pode-se ainda efetuar alguns comentários sobre a relação das mesmas com o trabalho objeto desta dissertação. A ferramenta denominada diagrama de Ishikawa é a que apresenta a possibilidade de se obter o conhecimento mais rápido do problema. Por ser uma forma estruturada de apresentação do problema (Falconi, 1992), permite também um detalhamento do problema até o nível requerido da análise, sendo empregado normalmente em uma etapa anterior ao uso de uma FMEA ou FTA.

Já a análise usando-se a ferramenta de Árvore de Falhas (FTA), além das possibilidades de identificação da relação causal entre os eventos e análise de confiabilidade decorrente da possibilidade de utilização da probabilidade de ocorrência entre os eventos, permite a obtenção de um melhor conhecimento dos sistemas analisados, podendo inclusive ser utilizada de forma paralela ou como complemento a alguma outra análise dos problemas. Na Unidade 36 em função de não se dispor da análise realizada na fase do projeto desta unidade, anterior à sua construção, restaria utilizar-se a FTA após a aplicação da FMEA, podendo-se obter através da mesma as possibilidades de ocorrência da não-função, a partir da identificação dos principais modos de falha levantados pela FMEA. Poderia ainda ser utilizada para possibilitar um maior conhecimento dos sub-sistemas da U-36 e o estabelecimento de relações entre os mesmos e os principais modos de falha analisados, servindo assim para facilitar a comunicação entre os membros dos grupos na análise dos modos de falha. Por se considerar que estes dados não acrescentariam muito a esta dissertação em função dos resultados que se pretendem alcançar, não será também utilizada a árvore de falhas para análise no caso da U-36, utilizando-se como ferramenta de confiabilidade portanto apenas a FMEA devido aos resultados possíveis e desejados de se obterem com esta dissertação.

Foi também proposta uma metodologia baseada na análise do parâmetro de disponibilidade que permitirá reavaliar e alterar a depender do resultado da

disponibilidade, a estratégia de manutenção adotada para os sistemas da U-36. A mudança destas alternativas aqui definidas (manter, modernizar, redesenvolver e desativar) será analisada utilizando-se além da disponibilidade, fatores como histórico dos equipamentos, fatores econômicos, condições do sistema consumidor e estado da arte existente, tornando assim a análise mais abrangente aos sistemas da U-36, sendo considerados também desta forma fatores externos à unidade.

Conforme já comentado, a melhoria da disponibilidade operacional da U-36, cuja média mensal calculada desde a sua partida é de aproximadamente 19% contra uma taxa pretendida de 90%, requer que sejam efetuadas alterações a fim de que possam ser alcançados os resultados propostos, que terão reflexos nos resultados da RLAM e na redução da poluição ambiental provocada pelas unidades de craqueamento desta refinaria, conforme já citado. As alterações requeridas para mudança desta realidade passam por modificações no projeto que por sua vez estão também relacionadas com o próprio gerenciamento da manutenção conforme será visto nos próximos capítulos desta dissertação. O capítulo 5 a seguir estabelece a metodologia que permitirá realizar a análise funcional da U-36, visando facilitar a identificação dos desvios das funções verificados nesta unidade, que estão relacionados às falhas ocorridas e que contribuem para ocorrência da sua baixa disponibilidade.

CAPÍTULO 5

ANÁLISE FUNCIONAL APLICADA À U-36

5.1 Introdução

Neste capítulo serão abordados os temas relativos à descrição e conceituação envolvendo a estrutura funcional de um sistema.

A definição e conceituação da função de um determinado sistema ou produto estão relacionadas, intrinsecamente, com a sua capacidade em realizar uma determinada tarefa.

A função principal que um determinado produto desempenha, chega a ser tão importante para a existência do mesmo, que muitas vezes o seu próprio nome se confunde com o nome desta função principal. É o caso, por exemplo da bateadeira de massa, máquina de secar roupas, etc., cujos nomes expressam diretamente a função principal destes equipamentos. A própria Unidade de Recuperação de Enxofre objeto do estudo desta dissertação também se enquadra perfeitamente neste caso, não sendo assim de se estranhar que o estudo e análise funcional desta unidade se tornam um importante aspecto relacionado à sua melhoria de disponibilidade e confiabilidade operacional.

As funções de um dado componente ou sistema são definidas originalmente durante as etapas do projeto informacional e conceitual do mesmo, sendo a função uma característica fundamental a ser trabalhada durante estas etapas.

O desdobramento de uma função global em sub-funções visa facilitar a análise funcional de um sistema e permitir estabelecer de forma mais clara, objetiva e simplificada, onde se dão os principais desvios decorrentes de um mau desempenho funcional.

A partir desta etapa consegue-se ainda estabelecer as soluções específicas para cada desvio encontrado, construindo-se assim a solução geral do problema para um determinado sistema a partir destas diversas soluções simplificadas citadas. A classificação das funções entre primárias e secundárias e a forma como as funções devem ser representadas numa análise funcional se constituem em importantes fatores determinantes do sucesso de uma análise funcional, sendo estes tópicos também abordados neste capítulo (Ullman, 1993).

Por último, será realizada a divisão da U-36 nos seus principais sistemas constituintes com o objetivo de realização da análise funcional desta unidade, estabelecendo-se os principais equipamentos considerados em cada um dos mesmos. A apresentação das principais funções primárias e secundárias destes sistemas visa fornecer subsídios que facilitem o estabelecimento da análise dos históricos de falhas desta unidade, bem como a caracterização dos modos de falha e efeitos das mesmas sobre as funções onde forem levantados os principais problemas e desvios ocorridos durante o período considerado de operação da unidade.

5.2 Análise funcional: conceitos principais

5.2.1 Análise da estrutura funcional de um sistema

A razão da existência de qualquer ativo físico está na necessidade do mesmo realizar alguma tarefa específica. A função está associada à razão principal de existir de um determinado componente, sistema ou ativo físico. Moubray (1997), Pahl & Beite (1995) definem o termo função como a relação entre entradas e saídas de um sistema. Já, segundo Back (1983), uma função é a relação entre causas e efeitos das grandezas de entrada e saída de sistema. Estes dois conceitos sintetizam a definição utilizada em engenharia para função, segundo a qual a mesma é definida como a relação existente entre as entradas e as saídas de um sistema físico.

Uma função é realizada por um sistema por meio de um dado comportamento, ou seja, uma seqüência de estados deste sistema. Assim, um sistema físico quando submetido a um dado estímulo, comportando-se de uma determinada forma, produz uma determinada resposta, também denominada como função deste sistema. Um mesmo sistema físico pode desempenhar diversas funções por meio de diferentes comportamentos. Assim, uma mesma barra metálica tanto pode conduzir eletricidade, como pode transmitir força axial, desempenhando assim em cada um dos casos uma diferente função.

O estudo da análise funcional de um sistema está também relacionado com a especificação do projeto ou reprojeto de um dado sistema ou produto, por se constituir na etapa posterior à fase de definição das especificações gerais, de acordo com a metodologia apresentada no capítulo 7 desta dissertação. O processo de projeto se inicia com as especificações do projeto obtidas pelas necessidades expressas. Estas especificações indicam dimensões, formas de funcionamento, consumo de energia,

quantidade de produção, o que produzir, etc. A partir daí desdobra-se em especificações funcionais até ter-se bem estruturada a função de cada um dos itens que fazem parte da função global. No caso de um reprojeto, a função global do produto analisado é desdobrada em sub-funções a partir dos dados existentes do produto, visando-se facilitar a visualização e a análise dos desvios existentes nas respectivas sub-funções, a partir dos quais serão realizadas as alterações de projeto necessárias capazes de adequar o produto à sua função global proposta originalmente.

As funções são divididas em duas categorias principais: primárias e secundárias (Moubray, 1997).

- Funções primárias: São as funções que exprimem os motivos principais aos quais determinados ativo físico se destinam. São de fácil reconhecimento uma vez que na maioria dos casos, o próprio nome do ativo já exprime esta função.
- Funções secundárias: Espera-se que muitos ativos realizem uma ou mais funções além daquelas tidas como principais. Essas são conhecidas como funções secundárias. São normalmente divididas nas 7 categorias: integridade ambiental, segurança/integridade, estrutural, controle/contenção/conforto, aparência, proteção, economia/eficiência e outras.

A definição das funções deve sempre procurar traduzir padrões de desempenho capazes de expressar de forma objetiva a finalidade do componente ou ativo físico analisado. As funções também devem ser definidas segundo a seguinte estrutura: um verbo, um objeto e o padrão de desempenho associado. Assim por exemplo, a definição da função principal de uma bomba centrífuga deve ser a de bombear um determinado produto a uma dada vazão e pressão (Moubray, 1997).

Pergunta-se: como a análise funcional pode ser usada ou integrada a um sistema de manutenção? Ora, sabe-se que os objetivos da manutenção, têm em suas atribuições, as tarefas de manter, modernizar, redesenhar e desativar os ativos físicos, conforme abordado no capítulo 4 desta dissertação. Autores como Moubray (1997), Blanchard (1995), Dias (2002), enfatizam ainda que a capacidade inicial de qualquer ativo é estabelecida pelo seu projeto, cabendo à manutenção apenas a garantia do ativo físico ao seu nível inicial de capacidade, não podendo portanto ultrapassá-lo sem se efetuarem alterações no seu projeto. Em outras palavras, a ação de manutenção não aumenta a confiabilidade ou disponibilidade de uma planta, além do que foi estabelecido no projeto. Um aumento destes atributos, só será obtido a partir da adoção

da alternativa de estratégia de manutenção, enquanto uma atividade de reprojeção na forma de modernização do ativo, atualização tecnológica, correção de erros de projeto, conforme será abordado no capítulo 6 desta dissertação. Em síntese, qualquer das tarefas de manter, recapacitar, redesenvolver e desativar sob atribuição da manutenção será mais adequadamente executada se tiver bem delineado uma análise funcional. Além disto, a análise funcional é a porta de entrada para o uso da FMEA e FMECA.

5.3 A análise funcional da U-36

A função primária da U-36 é evitar que o enxofre seja lançado para a atmosfera na forma de óxidos de enxofre provenientes das unidades de craqueamento catalítico e de produção de água ácida da RLAM, evitando-se desta forma a poluição ambiental decorrente destes processos. Trata-se assim de uma função ambiental que também tem reflexos econômicos, já que evita que sejam aplicadas multas por danos ambientais à RLAM, ajudando também na manutenção de uma imagem favorável da empresa junto à sociedade. A segunda função principal da U-36 é produzir o enxofre a partir do gás ácido originado das referidas unidades de processo. Trata-se de uma função eminentemente econômica. Para garantir estas funções um conjunto de sistemas técnicos tem que operar adequadamente.

Então de modo geral, tem-se como entrada na U-36 o gás ácido proveniente das unidades U-39, U-80 e U-6, e como saída, enxofre processado, água limpa, ar limpo e rejeitos. Visando simplificar e representar de maneira geral todo este processo, a Figura 5.1 traz o modelo funcional da U-36 onde os principais fluxos de entrada e saída desta unidade encontram-se representados.

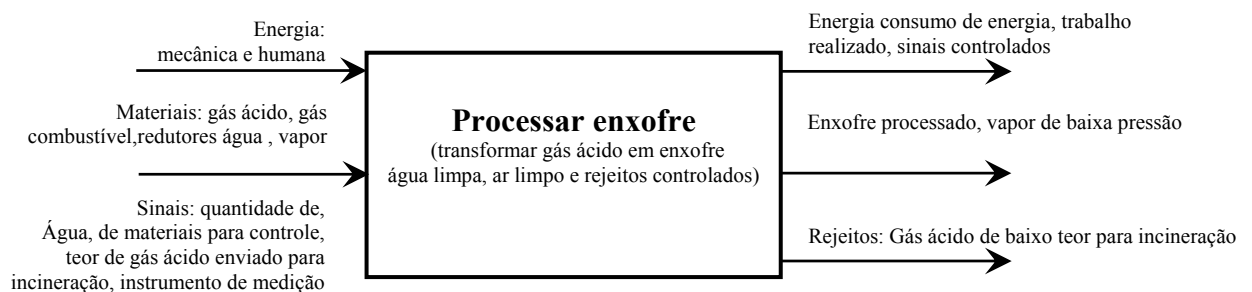


Figura 5.1: Modelo funcional da U-36, adaptado de Carrafa (2002).

O fluxograma de processo simplificado da Unidade de recuperação de enxofre U-36 também será utilizado para facilitar a identificação e compreensão dos principais

sistemas que compõem a U-36. Na Figura 3.3 conforme já mencionado, pode ser visto o referido fluxograma de processo.

A U-36 pode ser dividida nos seguintes sistemas:

- Alimentação;
- Reação térmica e recuperação de calor;
- Conversão catalítica e condensação;
- Incineração;
- Armazenamento de enxofre.

5.3.1 Sistema de alimentação

Responsável pelo armazenamento e preparação do gás ácido recebido das unidades U-6, U-39 e U-80. Composto do tambor de gás ácido (F-3601) (vide Figura 3.3) onde é armazenado o gás após recebimento das referidas unidades. Nele é realizada a drenagem do líquido decantado. Compõe ainda o sistema de alimentação, o sistema de pré-aquecimento do ar de combustão cujo principal equipamento é o pré-aquecedor de ar C-3602. O Quadro 5.1 resume as funções primárias e secundárias deste sistema.

Quadro 5.1: Funções do sistema de alimentação da U-36.

Sistema	Equipamentos	Função primária	Função secundária
Alimentação	F-3601	1.Possibilitar a drenagem da carga de gás ácido (2.826 Nm³ /h) da U-36 proveniente das unidades 6,39 e 80;	1.Acumular o gás ácido enviado para a U-36 ; 2.Separar e recolher resíduos de óleo da corrente de gás ácido;
	C-3602	1.Pré-aquecer 3608 Kg/h de ar de combustão a uma temperatura de 200 °C.	

5.3.2 Sistema de reação térmica e recuperação de calor

O sistema de recuperação de calor é composto principalmente pelo forno de reação térmica B-3601 e pela caldeira de recuperação de calor GV-3601 (vide Figura 3.3). O nome reação térmica é devido ao fato deste sistema ser responsável pela conversão em SO₂ de um terço do H₂S presente na corrente de gás ácido. Esta queima se dá no forno B-3601 na presença de ar em quantidades estequiométricas conforme já

mencionado no capítulo 3. A outra função deste sistema está na queima de impurezas presentes no gás ácido cuja falha poderá provocar a corrosão e/ou entupimento dos equipamentos seguintes a esta etapa do processo na unidade, além de danos aos catalisadores dos reatores.

Acoplada ao forno B-3601 encontra-se a caldeira de recuperação de vapor GV-3601 cuja principal função é a geração de vapor de alta pressão por meio da recuperação do calor gerado no processo de reação térmica. O Quadro 5.2 apresenta as funções primárias e secundárias deste sistema.

Quadro 5.2: Funções do sistema térmico e de recuperação de calor.

Sistema	Equipamento	Função primária	Função secundária
<i>Reação térmica e recuperação de calor;</i>	B-3601	<i>1. Converter em SO₂ 1/3 do H₂S presente na corrente de gás ácido enviado para a U-36;</i>	<i>1. Promover a queima completa do H₂S previsto evitando consumo excessivo de O₂; 2. Promover a queima completa de impurezas trazidas no gás ácido;</i>
	GV-3601	<i>1. Recuperar o calor gerado na etapa de reação térmica por meio da geração de 12649 kg/h de vapor de média pressão.</i>	

5.3.3 Conversão catalítica e condensação

Este sistema é composto principalmente pelos reatores catalíticos, condensadores e pré-aquecedores de todos os três estágios existentes no processo. A função principal deste sistema é a produção de enxofre por meio de reações catalíticas a partir de gás ácido não reagido proveniente da seção de reação térmica. Este processo conforme já descrito no capítulo 3, ocorre em série em três estágios consecutivos, compostos cada qual, nas etapas de pré-aquecimento, reação catalítica e condensação, respectivamente. A Figura 5.2 representa o sistema de reação catalítica no fluxograma de processo da U-36.

O Quadro 5.3 apresenta as funções primárias e secundárias destes componentes.

5.3.4 Incinerador:

Este sistema é composto principalmente pelo forno B-3603 onde é realizada a queima total do gás residual não convertido em enxofre e da corrente de gás rica em NH_3 proveniente da unidade de tratamento de águas ácidas U-80. Os gases de combustão são descartados para atmosfera pela chaminé, devendo-se obedecer aos limites de concentração de enxofre previstos na legislação ambiental. O principal equipamento deste sistema é o forno incinerador B-3603. O Quadro 5.4 apresenta as funções primárias e secundárias deste sistema.

5.3.5 Sistema de armazenamento de enxofre

Este sistema é composto principalmente pelo vaso de enxofre F-3611, para onde é enviado o enxofre líquido produzido na unidade, e pela bomba de enxofre J-3602, responsável pelo esgotamento do tanque F-3611 e envio do enxofre para o pátio de armazenamento, externo à unidade U-36, onde o enxofre é solidificado e embalado para expedição.

A capacidade do vaso de enxofre é de 273 toneladas, suficiente para armazenamento da produção da U-36 durante três dias à capacidade plena. O Quadro 5.5 apresenta as funções primárias e secundárias deste sistema.

Quadro 5.3: Funções do sistema de conversão catalítica e condensação.

Sistema	Equipamento	Função primária	Função secundária
<i>Conversão catalítica e condensação</i>	<i>Condensadores</i>	<i>1. Resfriar/ condensar o enxofre formado nos reatores catalíticos localizados a montante dos condensadores, permitindo o fluxo livre de enxofre pelos mesmos;</i>	<i>1. Separar o enxofre líquido da corrente de gás ácido não reagida do processo; 2. Produzir vapor de baixa pressão; 3. Pré-aquecer a água de alimentação da caldeira recuperadora (caso específico do condensador C-3608); 4. Possibilitar o escoamento livre do enxofre na vazão e temperatura requeridas ao longo dos condensadores e linhas.</i>
	<i>Reatores catalíticos</i>	<i>1. Converter em enxofre o SO₂ que deixa os pré-aquecedores;</i>	<i>1. Separar o enxofre líquido da corrente de gás ácido não reagida do processo; 2. Produzir vapor de baixa pressão; 3. Permitir o escoamento livre do enxofre na vazão e temperatura requeridas ao longo dos condensadores e linhas.</i>
	<i>Pré-aquecedores</i>	<i>Pré-aquecer a corrente de gás ácido que deixa o condensador do estágio anterior.</i>	<i>1. Separar o enxofre líquido da corrente de gás ácido não reagida do processo; 2. Produzir vapor de baixa pressão; 3. Permitir o escoamento livre do enxofre na vazão e temperatura requeridas ao longo dos condensadores e linhas.</i>

Quadro 5.4: Funções do sistema incinerador.

Sistema	Equipamento	Função primária	Função secundária
<i>Incinerador</i>	<i>B-3603</i>	<p><i>1. Incinerar o gás ácido residual não convertido em enxofre;</i></p> <p><i>2. Enviar para atmosfera resíduos com concentração de enxofre dentro dos limites estabelecidos pela legislação ambiental vigente.</i></p>	<i>1. Incinerar a corrente de gás rica em NH₃ proveniente da U-80.</i>

Quadro 5.5: Funções do sistema de armazenamento de enxofre.

Sistema	Equipamento	Função primária	Função secundária
Armazenamento de enxofre	<i>F-3611</i>	<i>1. Armazenar o enxofre produzido na unidade;</i>	<i>1. Manter o enxofre armazenado a uma temperatura entre 130 °C e 145 °C para possibilitar o escoamento do mesmo.</i>
	<i>J-3602</i>	<i>1. Bombear o enxofre líquido do F-3611 para o pátio externo à U-36 ;</i>	<i>1. Criar espaço no F-3611 para recebimento do enxofre produzido na U-36, mantendo-o sempre em condições de recebimento da vazão nominal de produção prevista.</i>

5.4 Considerações finais

O estudo da função de um dado sistema ou componente segundo a metodologia apresentada visa obter as relações de entrada e saída de um dado sistema. A função também é definida como a resposta dada por um sistema aos estímulos (entradas) que lhe são fornecidos.

Por outro lado conforme pode ser observado, uma função global pode ser decomposta em diversas outras funções menores necessárias à realização de uma dada tarefa, permitindo esta decomposição de funções, a obtenção de uma visão mais clara e

objetiva do problema analisado. A partir deste desdobramento, a solução de um dado problema de manutenção não será mais obtida focando-se o problema como um todo, mas sim a solução de cada uma das sub-funções identificadas, obtendo-se deste modo, os princípios de solução para cada sub-função analisada e a partir daí, construindo-se a solução geral do problema.

Neste ponto, a análise funcional permite uma abordagem muito útil, permitindo-se servir como uma importante ferramenta na análise de projetos, na qual a obtenção de uma alternativa de solução de projeto relativo a um problema de manutenção consiste no fracionamento do problema mais complexo apresentado.

Esta metodologia será empregada para analisar o problema de baixa confiabilidade apresentado pela U-36 e no levantamento de subsídios de informações à etapa do projeto informacional, com vistas à execução do reprojeto desta unidade, conforme será visto nos capítulos posteriores.

A análise funcional estabelece uma boa interatividade para a utilização de ferramentas de confiabilidade, de modo a se determinar os principais desvios das funções detectados na unidade U-36, pelo período de operação analisado. Este processo de análise ao mesmo tempo alimenta as necessidades hoje constatadas e ajuda a gerar os requisitos necessários para a fase informacional do reprojeto da U-36.

Por fim, a análise funcional torna-se também uma ferramenta eficiente para estabelecer o diálogo com os técnicos que trabalham nas diversas áreas do sistema que está sendo analisado. O fato de se ter bem definido a função principal e secundária, dá a quem está gerenciando a manutenção e também quem vai gerenciar o reprojeto, condições de recuperar as ações de manutenção, projeto inicial, etc., a partir de uma mesma base, ou linguagem técnica relacionada com os registros, conhecimento empírico e funcionamento dos sistemas, subsistemas e componentes.

CAPÍTULO 6

INFLUÊNCIA DOS ATRIBUTOS DE MANUTENÇÃO DA U-36 NA DEFINIÇÃO DA SUA ESTRATÉGIA DE MANUTENÇÃO

6.1 Introdução

A função manutenção assume no atual contexto de competitividade, presença significativa nas decisões estratégicas das empresas, em áreas como segurança ocupacional, meio-ambiente, qualidade do produto, disponibilidade, custos ambientais e custos operacionais. Azevedo (2001) observa que a gestão de ativos físicos pode ser entendida como gestão do ciclo total de vida do ativo industrial no contexto estratégico da empresa, a fim de otimizar o desempenho da instalação e em consequência maximizar o retorno do investimento realizado. O ciclo de vida de um equipamento se inicia antes do próprio processo de projeto, ou seja, quando se percebe ou se identifica as necessidades do usuário. Em seguida vêm as etapas de projeto (informacional, conceitual, preliminar, detalhamento), produção, fabricação, uso, se estendendo o ciclo até a retirada de operação do equipamento, conforme será mais detalhadamente abordado neste capítulo.

A baixa performance operacional apresentada pela U-36 desde a sua partida, traduzida pelos baixos indicadores verificados como por exemplo disponibilidade (FOI) inferior a 20%, custos de manutenção acima do previsto, falhas no atendimento ao cliente quanto ao fornecimento de enxofre decorrentes do elevado número de paralisações e poluição ambiental acima da meta prevista pela RLAM decorrente da contribuição dos gases ácidos não tratados pela U-36 que são enviados para atmosfera, apontam para a necessidade de alteração no modelo de gestão da manutenção nesta unidade, haja visto que o modo de atuar até então utilizado não tem obtido os resultados necessários.

Por se tratar de uma unidade com relativo pouco tempo de operação, as ações de manutenção até então desenvolvidas eram muito no sentido de se atuar de forma corretiva apenas, até se poder formar um banco de dados e experiência com a referida unidade capazes de poder indicar medidas mais eficazes e profundas. Neste sentido,

recorreu-se a outros órgãos da Petrobras que possuíam unidades similares à U-36 (com experiência já adquirida portanto na operação deste tipo de unidade), além do próprio projetista, quando foram inicialmente levantados alguns desvios em relação ao projeto inicial conforme já comentados, destacando-se a diferença encontrada na temperatura da corrente de enxofre no sistema de reação térmica, que a princípio ocasionava parte dos problemas verificados na unidade. Foram assim adotadas medidas que não implicavam em modificações estruturais ou de projeto da unidade, destacando-se a realização do plugueamento parcial nos condensadores e caldeira de recuperação de calor, que visava a adequação destes equipamentos ao problema verificado com a vazão e concentração de H_2S do gás ácido utilizado na U-36.

A estratégia de manutenção “Manter” continuava a ser adotada na U-36, e as ações de manutenção desenvolvidas dentro desta ótica, mesmo após as medidas iniciais citadas, não obtiveram êxito, persistindo-se o problema de baixa disponibilidade da unidade, e de todos os demais indicadores citados anteriormente. Outros ajustes e serviços foram realizados durante esta fase, sem entretanto nunca ter sido realizado uma alteração significativa em seu projeto, até porque se tratava de unidade recente que também pouco operara em função das paralisações ocorridas. Em unidades deste tipo existe ainda o agravante de que a paralisação da unidade provoca a aceleração do processo corrosivo em seus equipamentos devido a ação de compostos como H_2SO_4 decorrentes do resfriamento do gás ácido remanescente no interior dos mesmos, o que compromete a manutenibilidade da unidade, agravando ainda mais o problema da sua disponibilidade, custo de manutenção e atendimento ao cliente, gerando-se ainda mais manutenção corretiva sem que tais serviços resultem numa mudança dos resultados esperados.

Mesmo se tratando de um produto na fase jovem, esta situação demonstra que é necessária a alteração da estratégia de manutenção para a U-36. A escolha da nova estratégia a seguir como redesenvolver ou até desativar deverá ser tomada em função dos resultados obtidos nos atributos da manutenção (disponibilidade, custos, confiabilidade, etc.) ou ainda, em se tratando de produtos com fases de vida mais avançadas, em função também de necessidade de adequação do produto às exigências de fatores externos. Em ambos os casos entretanto, a mudança deverá ser norteadas por critérios e metodologias que dêem suporte a esta tomada de decisão. Uma revisão

bibliográfica sobre os principais aspectos da atividade de manutenção relacionados ao tema bem como uma avaliação dos resultados de alguns dos atributos de manutenção obtidos na Unidade de recuperação de enxofre U-36 da RLAM visando-se a escolha da estratégia de manutenção mais adequada à mesma serão apresentados ao longo deste capítulo.

6.2 O atributo custos

6.2.1 O fator custos na indústria de petróleo

As indústrias de refino de petróleo no mundo apresentaram variação dos seus custos de manutenção ao longo dos anos, que como não poderia deixar de ser, encontra-se relacionada às variações da rentabilidade deste segmento. A Figura 6.1 ilustra como se comportou a rentabilidade destas indústrias entre os anos de 1986 a 1992. Entre o período 1986-1988 houve um aumento que pode ser atribuído às condições de mercado (Ricketts, 1994). Devido à guerra do Golfo em 1990, a rentabilidade iniciou um processo de declínio. A referida figura representa a rentabilidade das indústrias de refino durante o período de 1986 a 1992. Nele estão representadas as indústrias de maior rentabilidade (“1st Quarter”) as de média e baixa rentabilidade (“Industry average” e “4th Quarter”, respectivamente).

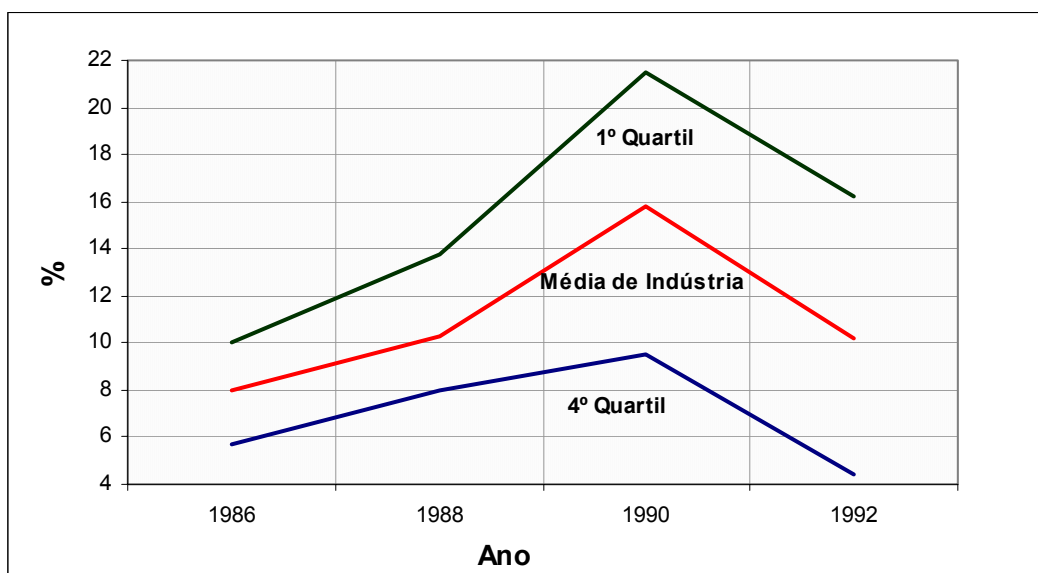


Figura 6.1: Rentabilidade da indústria de refino no período 1986-1992.

O primeiro quartil representa os 25 % das indústrias deste segmento que obtiveram as maiores rentabilidades, enquanto que o quarto quartil, os 25% que obtiveram as menores rentabilidades.

Analisando-se os dados, constata-se que a diferença existente entre os grupos de maior e menor rentabilidade que era de cerca de 5% no ano de 1986 aumentou para cerca de 12% em 1992.

Comportamento similar foi verificado nos dados relativos aos custos de manutenção destas categorias de indústrias, onde aquelas de maior rentabilidade apresentaram um aumento de custo de manutenção relativamente menor em relação às aquelas de menor rentabilidade. A Figura 6.2 representa o custo total anual de manutenção por barril de petróleo processado de acordo com Rickets (1994).

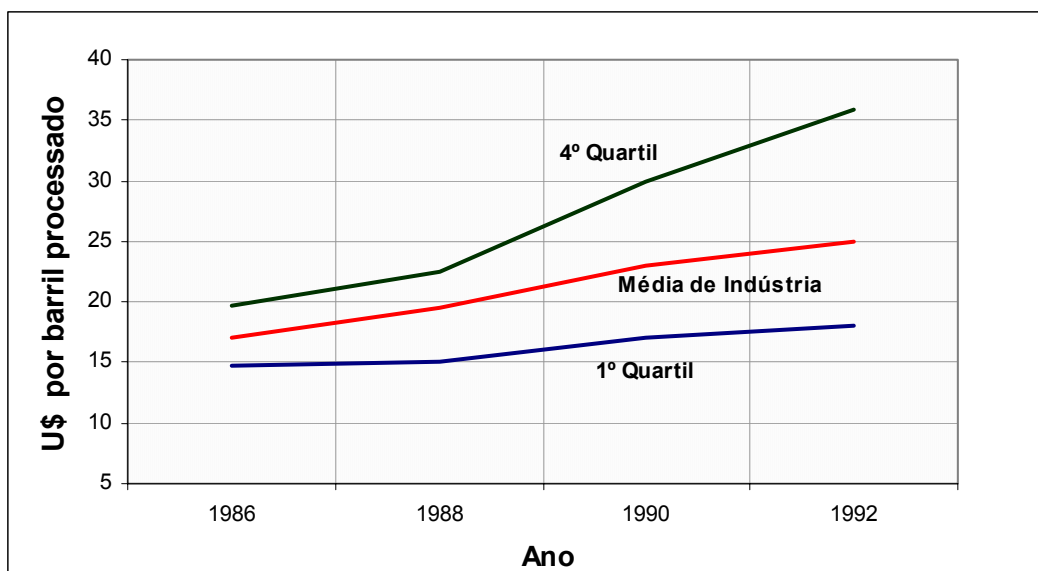


Figura 6.2: Evolução do custo de manutenção da indústria de refino.

Período 1986-1992 (Rickets, 1994).

As indústrias de média rentabilidade apresentaram um aumento do custo de manutenção da ordem de 6%. O mesmo é atribuído à inflação naquele período. Entretanto a curva que representa os custos de manutenção mais baixos está associada às empresas de maior rentabilidade da Figura 6.1. Por outro lado, as empresas que possuem um custo de manutenção mais alto são as mesmas que apresentam uma baixa rentabilidade. Enquanto as primeiras com maior rentabilidade, apresentaram um

aumento do custo de manutenção da ordem de 1% no período analisado, as empresas do quarto quartil dobraram o custo de manutenção no mesmo período.

Outro ponto a ser destacado nesta análise é que um maior desempenho da manutenção não está associado a um aumento dos seus custos, conforme pode ser observado na Figura 6.3, aonde se encontra representado o desempenho na manutenção de 11 refinarias que embora tenham tido elevação significativa nos seus custos de manutenção, tiveram neste mesmo período uma queda acentuada nos seus desempenhos.

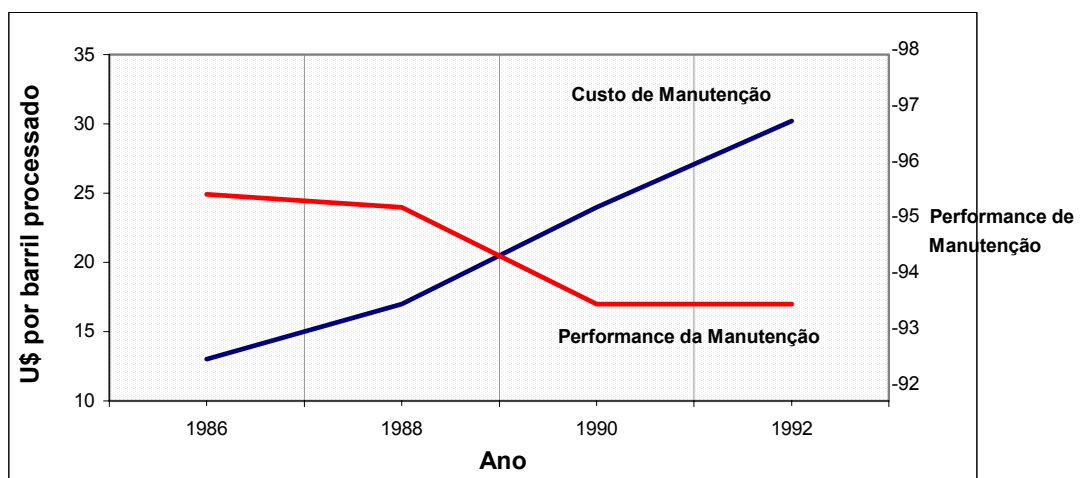


Figura 6.3: Resultados de manutenção em indústrias de refino que apresentaram maiores custos. (Rickets, 1994).

Observações sobre o desempenho de diversas unidades apontam que a performance das mesmas estaria muito mais relacionada a fatores comportamentais da equipe, do que a outros aspectos como idade da planta, capacidade e complexidade do processo (apesar dos mesmos não poderem ser totalmente descartados da análise). A performance de cada refinaria reflete assim a atitude coletiva e o espírito da equipe existente, tendo estes fatores um papel predominante sobre qualquer outro fator considerado isoladamente. O referido espírito de equipe consegue ser construído e melhorado com a criação de um sistema de gestão participativo que dará suporte à implantação das melhores práticas, obtendo-se assim com a sua implantação a melhoria nos resultados da empresa.

Além disso, a utilização de ferramentas da confiabilidade no dia a dia da manutenção das refinarias tais como o FMEA, Árvore de falhas, Diagrama de Ishikawa, etc., na análise dos problemas e proposição das soluções necessárias possíveis, permitem sistematizar o processo de melhoria da confiabilidade destas unidades, de modo a que se possa assegurar uma disponibilidade, rentabilidade e produtividade necessárias às suas sobrevivências. Desta forma fica evidente a relação entre os custos de manutenção e rentabilidade da empresa, quando o aumento do primeiro não significa necessariamente em aumento de rentabilidade. A escolha da estratégia de manutenção adequada além da própria gestão desta atividade terão reflexos diretos e imediatos neste indicador de manutenção.

Devido a esta relação entre custos de manutenção, rentabilidade das empresas e o próprio processo de desenvolvimento da manutenção, incluindo-se aí por exemplo a capacitação na gestão das equipes e utilização de ferramentas de confiabilidade, conforme mencionado, é possível adotar na indústria de petróleo os custos de manutenção como um importante indicador da performance da manutenção deste segmento.

6.2.2 A influência do fator custos na sobrevivência de um produto

Ao longo de todas as etapas do ciclo de vida de um produto, um importante fator que além de ser determinante na sobrevivência do mesmo, deve ser acompanhado e repensado constantemente ao longo de todas as etapas do ciclo de vida, é o custo, incluídos aí tanto o operacional como o de manutenção. Blanchard (1995) alerta que a maior parcela relativa aos custos de um produto ao longo de sua vida é determinada ainda na fase de projeto quando são estabelecidos os fatores que definirão e determinarão os custos deste produto ao longo de todas as etapas do seu ciclo de vida. A figura 6.4 estabelece uma relação entre as oportunidades de economia de custo, custo acumulado desembolsado, custo real projetado ao longo das etapas do ciclo de vida de um produto.

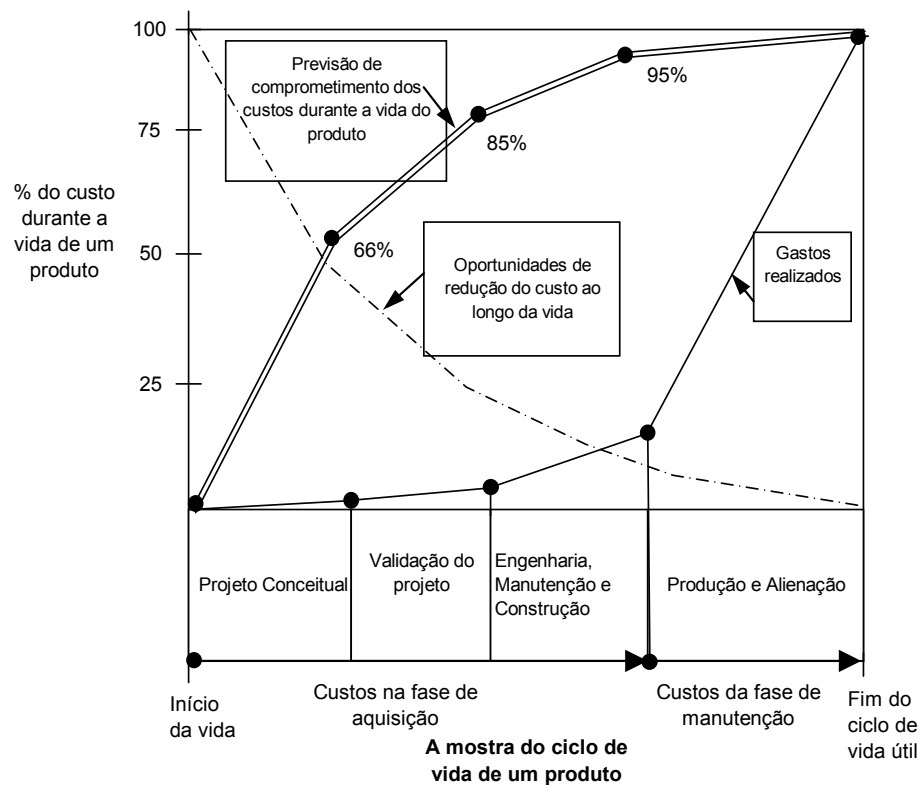
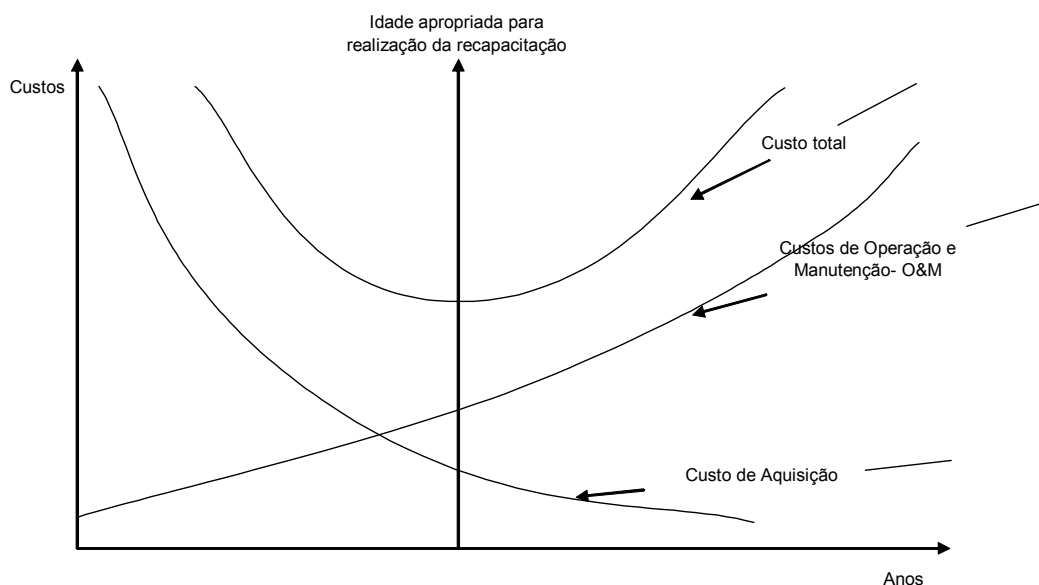


Figura 6.4: Custos ao longo do ciclo de vida de um produto (Blanchard, 1995).

Destaca-se que as maiores oportunidades de ganhos com relação aos custos estão localizadas justamente nas fases iniciais de projeto. Blanchard (1995) dá ênfase a que nesta fase devem ser considerados todos os aspectos relativos a custos, incluindo-se também os custos de longo prazo, e não apenas aqueles mais perceptíveis durante as etapas de fabricação, produção e projeto. Alerta ainda que parcelas de custos assumidos nos sistemas operacionais e de logística são muitas vezes negligenciados nesta etapa.

Jardine e Buzacott (1985) e Camargo (1981) estabelecem uma relação entre o custo total (composto pelos custos de manutenção/operação e de aquisição) e a idade de um produto. A figura 6.5 representa esta relação na qual se observa uma crescente evolução do custo total após a idade ótima para se efetuar a recapacitação.



**Figura 6.5: Relação entre custos e idade do equipamento
(Blanchard, 1992).**

Este ponto deve ser identificado ao longo da vida de um produto, para que as medidas de recapacitação e modernização sejam tomadas no momento adequado, evitando-se aumentos desnecessários de custos capazes de reduzir a competitividade ou até mesmo inviabilizar a sobrevivência do referido produto. A figura 6.5 caracteriza assim a influência da estratégia de manutenção na evolução dos custos de um produto ao longo da sua vida.

No caso da U-36, o indicador “custos” passou a ser estabelecido e acompanhado a partir do ano de 2005, sendo o mesmo constituído apenas pelo valor dos serviços de manutenção realizados neste período. O valor previsto para os custos de manutenção da U-36 foi estabelecido, baseando-se nos dados relativos de custos de manutenção de unidades compatíveis em nível de tamanho e complexidade com a U-36. Desta forma o valor previsto para os custos de manutenção da U-36 para o ano de 2005 foi de R\$ 1.850.000,00. No entanto, no período foram consumidos R\$ 2.313.962,00, que representa um acréscimo em relação ao previsto de cerca de 25%, sem que tenha havido melhoria relativa da sua disponibilidade ou performance de manutenção. Este acréscimo em relação ao previsto é sem dúvidas, reflexo da existência de problemas de manutenção na U-36, cujas análises e soluções estão relacionadas com os objetivos desta dissertação. Torna-se assim evidente a importância da aplicação do método sugerido nesta dissertação, que propõe a realização do reprojeto para a U-36, e que terá

também deste modo influência na alteração da tendência de aumento de custos já apresentada pela unidade.

6.3 O atributo disponibilidade

Os principais conceitos envolvendo este atributo já foram descritos no capítulo 4 desta dissertação. Os itens a seguir tratam especificamente da disponibilidade da U-36.

6.3.1 O indicador disponibilidade da U-36

Esta característica apesar de não ter sido definida nas condições de projeto da unidade U-36, tem o seu valor estabelecido como um parâmetro importante na RLAM, denominado de “FOI” (Fator Operacional Interno) que se constitui em um dos indicadores de gestão da refinaria. O “FOI” é definido como a disponibilidade operacional de uma determinada unidade de processo a uma carga de referência previamente estabelecida durante o intervalo de um mês. No caso da U-36, passou-se a estabelecer um valor de FOI a partir apenas do ano de 2005, sendo só a partir deste instante que o mesmo passou a ser acompanhado de forma sistemática. O valor do FOI é estabelecido a partir de um processo de negociação anual de metas entre a RLAM e a Sede da Petrobras representada pela Diretoria Executiva de Abastecimento, tendo sido definido no caso específico da U-36 um valor de FOI igual ou superior a 90% para uma carga de referência igual à nominal definida em projeto para a U-36, ou seja, uma produção mensal de enxofre de 2.160 ton/mês.

Um fator relevante também para a disponibilidade da U-36 é o fato da mesma não conseguir operar sem a U-39, principal fornecedora de gás ácido e fornecedora exclusiva de ar para o processo de combustão da U-36. Deste modo as paralisações ocorridas na U-39 afetam também significativamente a disponibilidade da U-36, agravando ainda mais o mau resultado deste indicador. Segundo levantamento realizado a partir do ano de sua partida em novembro de 2001, a U-36 apresentou uma disponibilidade média de 19 %. A tabela 6.1 apresenta os períodos em que a U-36 esteve em operação, sendo calculada a partir dos mesmos a sua disponibilidade até o mês de junho de 2005.

Tabela 6.1: Períodos em que a U-36 esteve em operação (Fonte:Plant Information, RLAM, 2005).

INÍCIO OPERAÇÃO	TÉRMINO OPERAÇÃO	TEMPO DE OPERAÇÃO (DIAS)
20/11/01	6/1/02	47,00
8/1/02	26/1/02	18,00
29/1/02	27/2/02	29,00
6/3/02	7/3/02	1,00
21/8/02	27/8/02	6,00
31/8/02	4/9/02	4,00
18/10/02	25/10/02	7,00
26/5/03	29/5/03	3,00
12/6/03	21/6/03	9,00
29/1/04	31/1/04	2,00
7/2/04	17/2/04	10,00
4/3/04	4/4/04	31,00
12/5/04	19/5/04	7,00
31/5/04	18/6/04	18,00
17/7/04	24/7/04	7,00
31/12/04	14/1/05	14,00
31/1/05	1/2/05	1,00
3/2/05	6/2/05	3,00
23/2/05	13/3/05	18,00
5/6/05	15/6/05	10,00
20/6/05	28/6/05	8,00
TOTAL(DIAS)		253,00

6.3.2 Disponibilidade e as estratégias de manutenção em unidades de recuperação de enxofre

A estratégia de manutenção definida para um determinado sistema deve estar em conexão e atender a aspectos relacionados à obtenção dos parâmetros operacionais previamente definidos na etapa de projeto, além de atendimento aos atributos de manutenção definidos para este sistema. O não atendimento a alguns destes resultados deve ser analisado e relacionado dentre outros fatores com o tipo de estratégia de manutenção adotada (manter, modernizar, redesenvolver ou desativar) podendo a depender do caso, implementar-se uma estratégia de manutenção diferente daquela atualmente utilizada, visando-se a obtenção de resultados mais próximos aos definidos na fase de projeto da unidade. No capítulo 4, figura 4.3 se procedeu a definição de um modelo de gerenciamento de manutenção baseado na disponibilidade, no qual a

estratégia de manutenção é alterada em função da não obtenção dos resultados pretendidos para a disponibilidade.

No presente caso da U-36, a disponibilidade está relacionada mais diretamente com os seguintes fatores de contorno específicos:

- Elevado impacto ambiental provocado pela paralisação desta unidade devido ao envio para atmosfera dos compostos de enxofre produzidos na refinaria, acarretando o descumprimento à legislação ambiental em prejuízo às pessoas, meio-ambiente e equipamentos (desencadeamento de processos corrosivos).
- Efeitos operacionais adversos decorrentes de paralisações não programadas da U-36, provocados pela dificuldade em se purgar e condicionar a unidade adequadamente durante o processo de parada, acarretando-se deste modo problemas como obstrução e corrosão nas linhas e equipamentos da unidade, o que compromete a manutenibilidade da unidade.
- Elevação dos custos de manutenção acima do previsto em decorrência de necessidade de realização de serviços para correção da acentuada corrosão da unidade devido às paralisações ocorridas.
- Interrupção à produção de enxofre com prejuízos de fornecimento aos clientes deste produto.
- Não cumprimento do FOI de 90% previsto.

Todos estes fatos evidenciam de acordo com o modelo de gerenciamento de manutenção baseado em disponibilidade proposto, a necessidade em se efetuar uma mudança em relação à estratégia de manutenção “manter” atualmente adotada para a U-36

A figura 6.6 apresenta uma relação entre os valores de disponibilidade e as estratégias de manutenção a serem adotadas em unidades de recuperação de enxofre baseada na experiência das equipes de manutenção envolvidas com este tipo de unidade.

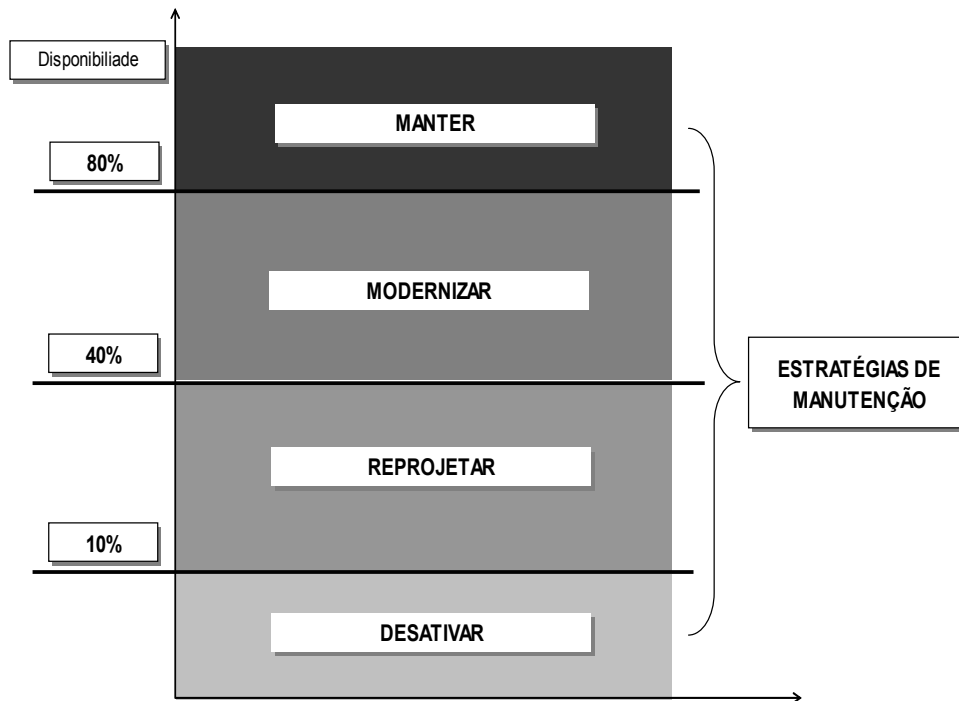


Figura 6.6: Relação entre disponibilidade e estratégias de manutenção em unidades de recuperação de enxofre.

De acordo com as definições estabelecidas e segundo o gráfico da figura 6.6, a mudança de estratégia já deverá se verificar a partir de valores de disponibilidade inferiores a 80% com a mudança para a estratégia de ‘Modernizar’, o que já requer alterações no projeto original da unidade. Valores para a disponibilidade entre 40% e 20% já requerem alterações de projeto mais significativas, com revisões a partir de reanálise da etapa informacional do projeto.

No caso específico da U-36 que apresenta uma disponibilidade de aproximadamente 20%, de acordo com a metodologia apresentada, fica evidente a necessidade de realização do reprojeto em alguns dos seus sistemas, visando-se a adequação à disponibilidade de 90% requerida para esta unidade.

6.4 Considerações finais

Contextualizando o tema deste capítulo em relação ao problema específico da U-36, algumas considerações são feitas.

Em relação à função manutenção: Hoje a unidade tem em sua política de manutenção tarefas de manutenção corretiva (que representam 60% das atividades), manutenção preventiva de condição ou preditiva (10% das atividades) e tarefas de manutenção preventiva baseada no tempo, que são feitas durante as paradas das unidades que fornecem gás ácido para o processamento de enxofre (especificamente a U-39), e que representam 30% em média do total dos serviços realizados na unidade.

Em relação à gestão de manutenção, adota-se um modelo matricial integrado ao sistema de produção, cujas tarefas e ações de manutenção relativas ao item anterior são executadas pela gerência de manutenção industrial (como apresentado no capítulo 2 – figura 2.3 sobre a estrutura administrativa da RLAM). Já as programações de atualização ou modernização são feitas pela gerência de engenharia a partir de solicitações efetuadas por membros das gerências de produção, manutenção industrial ou otimização, de acordo com estrutura citada na figura 2.3.

No que se refere aos custos de manutenção, a U-36 tem apresentado um valor cerca de 25% superior ao previsto, não computados neste caso os custos referentes à perda de produção decorrentes das paralisações ocorridas na unidade.

Como já foi sinalizado no capítulo 1, a U-36 é uma unidade nova, iniciada em 2002, com um ciclo de vida programado para 45 anos. Há unidades como esta no mundo operando há mais de 40 anos. Assim sendo, ela ainda está no período de juventude da curva da taxa de falha. Neste período, recomenda-se a estratégia gerencial de manter, quando a confiabilidade, disponibilidade e custo operacional e de manutenção estão conforme o especificado no projeto. A U-36, contudo, tem apresentado uma disponibilidade média de 19% entre 2002-2005, inaceitável para cumprir a função representada na figura 5.1, além de apresentar também desvios quanto aos demais atributos citados (custos e confiabilidade). Em face da diversidade de problemas apresentados, e de acordo com a análise dos resultados dos seus atributos de manutenção e da metodologia proposta neste capítulo, cabe-se recomendar a ação de redesenvolvimento, centrado num reprojeto, onde devem ser priorizadas as necessidades

da RLAM, com vistas ao atendimento das suas diretrizes ambientais, de custos e operacionais. Assim sendo, um conjunto de requisitos devem ser levantados e devidamente especificados para ajudar os projetistas nesta tarefa. De uma forma geral, não haverá mudança no conceito da planta, como também estão dominados as ferramentas e conhecimentos para o projeto preliminar e detalhado.

Faz-se deste modo necessário a apresentação também nesta dissertação de uma revisão bibliográfica sobre metodologias que visem a análise dos ciclos de vida de um produto com ênfase à obtenção de dados para o projeto informacional, para que possam ser utilizados em um posterior reprojeção e recapacitação do produto. Uma revisão sobre as metodologias de projeto é efetuada no capítulo 7 desta dissertação.

Entende-se assim, que é o projeto informacional a fase de projeto a ser priorizada, para dar à U-36 a capacidade operacional requerida em termos de disponibilidade e produtividade.

CAPÍTULO 7

DESENVOLVIMENTO DAS ESPECIFICAÇÕES PARA O REPROJETO DA U-36

7.1 Introdução

Pelo que foi apontado nos capítulos precedentes, infere-se que unidade U-36 não está devidamente adequada à função requerida no contexto da RLAM. Tal fato pode ser sintetizado no limitado percentual de disponibilidade operacional, resultante da baixa confiabilidade e da difícil manutenibilidade apresentados por esta unidade. Também pode ser somado a isto a inadequação da unidade em processar todos os tipos de gás ácido originados no processo da RLAM conforme inicialmente previsto no projeto. Hoje, o processamento de enxofre é feito somente para a U-39. Todas estas constatações indicam que a U-36 precisa sofrer um processo de reprojeto, considerando, agora de maneira formalizada todas as necessidades e requisitos operacionais para o pleno funcionamento da unidade, cuja disponibilidade deve ser igual ou maior do que a presente na RLAM.

Assim sendo, apresenta-se neste capítulo as ferramentas e o processo metodológico recomendável para uma ação de projeto nesta magnitude. Portanto, este capítulo apresentará as principais etapas de todo este processo de projeto, sendo dada ênfase entretanto à primeira fase, denominada de projeto informacional, cuja saída é a lista de especificações, que será usada na fase seguinte, projeto conceitual desta metodologia.

Um aspecto importante a considerar neste desenvolvimento de reprojeto da U-36, refere-se ao fato de isto ser demandado fortemente pela necessidade de uma mudança da política de gestão da manutenção, segundo as percepções levantadas no capítulo 6 desta dissertação.

7.2 Metodologias de projeto

Muitas são as metodologias para desenvolvimento de produtos presentes na literatura. Nesta dissertação não se fará um detalhamento das várias tendências, métodos

e processos que são pesquisados e utilizados no contexto da pesquisa em metodologia de projeto de produto e na própria aplicação da metodologia.

A idéia aqui é assumir a metodologia que vem sendo desenvolvida no âmbito do Núcleo de Desenvolvimento de Integrado de Produtos, NEDIP, do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC, a partir da publicação de diversos autores como Back (1983), Ogliari (1999), Fonseca (2000), Maribondo (2000), Romano (2003), entre outros.

A metodologia de projeto de produto proposta por estes autores pode ser resumida em quatro fases: fase informacional, fase conceitual, fase preliminar e fase detalhada.

A metodologia para o processo de projeto do produto, no seu sentido mais amplo, pode ser aplicada a um item de uma máquina, uma máquina ou um sistema produtivo, como é o caso. Deve-se salientar também, que um reprojeto é em síntese um projeto. No caso do reprojeto muitas vezes não se altera o conceito geral do produto. Particularmente, no caso da U-36, o conceito para o processamento de enxofre não será alterado, sendo mantido o processo como definido no método Claus. Assim, no reprojeto serão abordadas outras necessidades e requisitos que não foram contemplados no projeto atual, para garantir a disponibilidade desejada de 90%.

7.3 A etapa do Projeto Informacional (esclarecimento da tarefa)

Nesta fase o problema é analisado e as informações sobre o mesmo são coletadas. Baseando-se nestas informações uma especificação de projeto é elaborada. Esta especificação deve definir funções, propriedades requeridas do produto, bem como possíveis restrições aos processos de projeto, normas, prazos, etc.

Esta dissertação fará uma breve revisão dos principais conceitos que envolvem esta etapa de projeto visando-se conferir um melhor entendimento à sua utilização no presente caso.

A metodologia de projeto desenvolvida no âmbito do Núcleo de Desenvolvimento de Integrado de Produtos, NEDIP, do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC e que será utilizada nesta dissertação pode ser resumida de acordo com a figura 7.1.

A lista de especificações de projeto - ou simplesmente “especificação de projeto” - é o último e principal modelo da fase de esclarecimento da tarefa. É a referência básica do projeto. A lista de especificações é o ponto de partida (front-end) e também o guia para o processo de projeto de um produto. Fornece parâmetros para

avaliação dos modelos de produto desenvolvidos ao longo do processo de projeto. Nas palavras de Pugh (1991), a especificação de projeto do produto (PDS – “Product Design Specification”) age como um manto envolvendo o núcleo central de atividades do projeto.

No projeto informacional, as necessidades percebidas do mundo real são transformadas em especificações globais. Para garantir-se um correto entendimento destas necessidades e consequentemente uma efetividade do projeto que será originado com a especificação gerada a partir destas necessidades, é definido o projeto informacional que atua desde a percepção da necessidade até a obtenção da lista de especificação, garantindo-se deste modo que a informação sofra um criterioso tratamento para a sua correta interpretação.

No método proposto do NEDIP o projeto informacional pode ser dividido nas seguintes etapas:

1. Estudo preparatório da tarefa do projeto
2. Definição dos diferentes tipos de usuários
3. Definição das necessidades de projeto
4. Conversão das necessidades em requisitos de usuário
5. Conversão dos requisitos de usuários em requisitos de projeto
6. Avaliação dos requisitos de usuário contra requisitos de projeto
7. Conversão de requisitos de projeto em especificações de projeto

Em face de se ter definido a especificação do reprojeto, no objetivo desta dissertação, como sendo: identificar os principais problemas que têm gerado as constantes indisponibilidades operacionais da U-36 e apontar as soluções mais adequadas ou, pelo menos, sugerir prioridade nas que tenham a maior probabilidade de sucesso, pretende-se apresentar os resultados obtidos do projeto informacional, a partir dos levantamentos feitos no âmbito da empresa, nos relatórios de gestão, em seus formulários de projeto, nas entrevistas com colaboradores, nas informações apresentadas nos questionários aplicados para este fim.

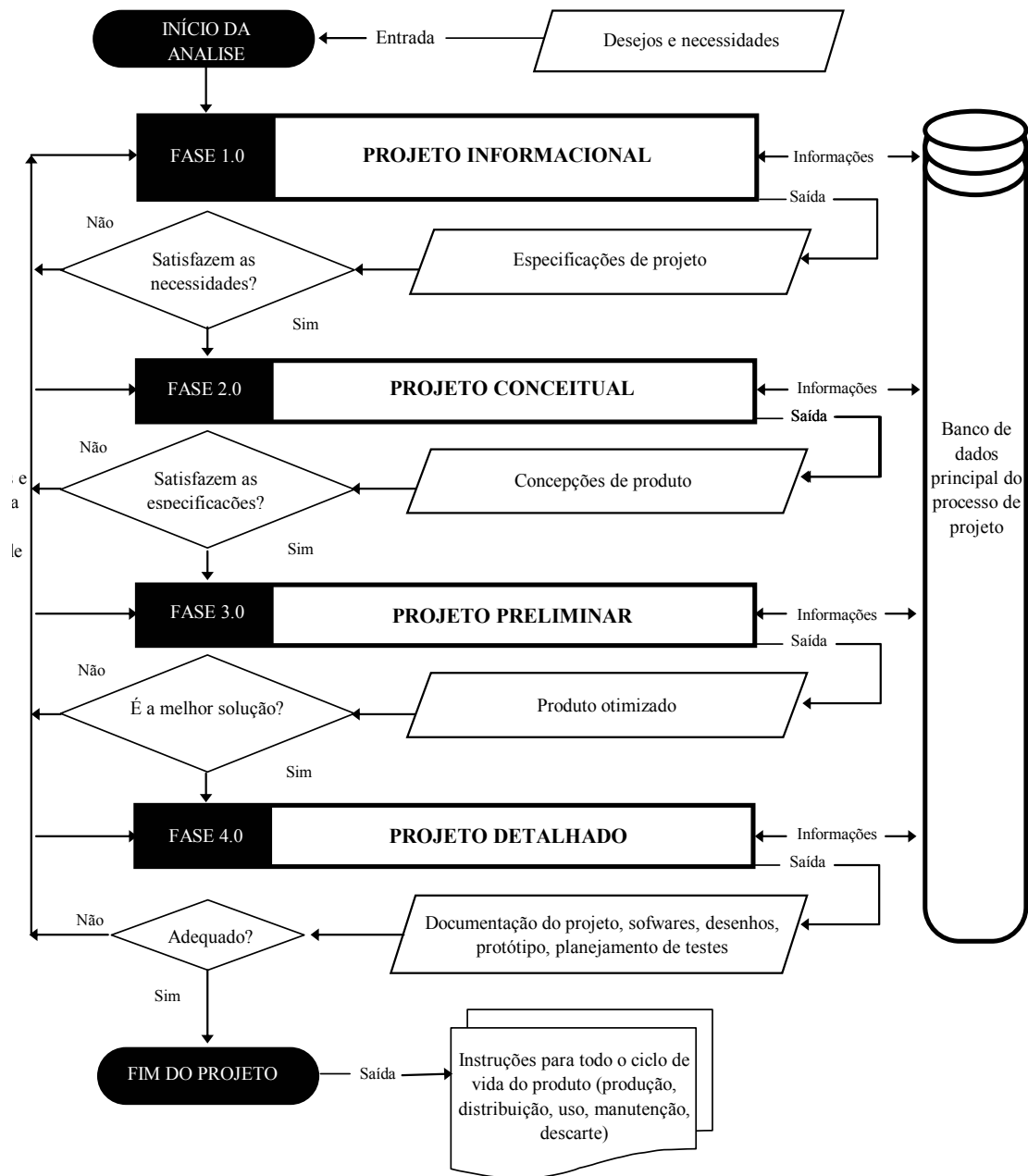


Figura 7.1: Metodologia de projeto desenvolvida pelo Nedip (Matos, 1999).

7.3.1 Definição das necessidades de projeto

As necessidades do reprojeto da U-36 foram definidas como as modificações a serem implementadas na unidade, capazes de corrigir os desvios de algumas de suas funções principais e que resultarão na melhoria da sua disponibilidade operacional. Para a sua identificação, foi elaborado questionário e realizadas entrevistas com os usuários da unidade, definidos nesta dissertação como as equipes responsáveis pela operação e manutenção da unidade. O referido questionário se encontra no Anexo I desta dissertação.

7.3.2 Conversão das necessidades em requisitos de usuários e em requisitos de projeto

As necessidades traduzidas pelos usuários da U-36 de certa forma já apresentam uma terminologia técnica específica, sendo apenas filtradas as subjetividades existentes. Os atributos de produto previstos nesta metodologia se referem às propriedades do mesmo que dão características de produtividade, manutenibilidade, segurança, disponibilidade, etc.

No caso da U-36, os requisitos gerais de projeto já se encontram devidamente definidos no manual de projeto desta unidade. Quanto ao reprojeto, objeto desta dissertação, os requisitos de projeto necessários serão definidos e priorizados a partir dos desvios identificados nas funções dos seus principais sistemas que estão levando à baixa disponibilidade apresentada pela U-36. Para este levantamento são utilizados como ferramentas, além do questionário e entrevistas já citados, a realização de uma FMECA com os representantes dos usuários da U-36. Observa-se que a FMECA foi aplicada para ajudar na fase informacional, destacando-se que a mesma neste caso tem como objetivo a geração de informações para o reprojeto, diferentemente das suas aplicações tradicionais, quando a mesma é utilizada nas etapas de detalhamento do projeto preliminar, ou já nas etapas de fabricação e uso de um produto. Deste modo puderam ser identificados os principais desvios daquelas funções da U-36 que efetivamente foram os maiores responsáveis pela baixa disponibilidade apresentada pela U-36. Deve ser ressaltado assim que em virtude do objetivo da sua aplicação nesta dissertação, não são consideradas na aplicação da referida FMECA todas as funções da U-36 mencionadas no capítulo 5 desta dissertação, e sim simplesmente aquelas onde

foram verificados os eventos de paralisação da unidade mais significativos que resultaram na baixa disponibilidade apresentada pela unidade.

7.3.3 Conversão dos requisitos de projeto em especificações de projeto

As especificações de projeto definem formalmente os critérios técnicos operacionais, de manutenção, de logística e demais naturezas que possam cumprir os requisitos que efetivamente alcançaram a satisfação das necessidades (Blanchard & Fabrick, 1990). As especificações são formadas a partir dos requisitos de projeto e da sua respectiva identificação com seu maior ou menor grau de equivalência com os requisitos dos usuários definidos. Da mencionada equivalência citada acima, são definidas as especificações de projeto a partir dos requisitos de projeto mais importantes em relação aos requisitos dos usuários mais relacionados com o problema proposto. Para determinação deste grau de proximidade entre os requisitos de projeto e de usuário, utiliza-se geralmente o método da Casa da Qualidade- QFD. No presente caso desta dissertação entretanto, esta priorização será obtida com o emprego da FMECA, utilizando-se para tal o NPR alcançado para cada um dos modos de falha analisados, conforme será demonstrado a seguir neste capítulo.

Visando-se também um melhor entendimento quanto à aplicação do método proposto referente à diferença conceitual entre projeto e reprojeto, vale a pena destacar mais uma vez que enquanto no projeto de um produto, parte-se de uma necessidade detectada no mercado e busca-se chegar a um produto que atenda a tal necessidade, no reprojeto, busca-se a modificação de um produto existente, alterando-se as características e funções que não satisfazem suficientemente as necessidades de mercado ou a próprias especificações originais. A figura 7.3 ilustra a diferença entre o projeto o reprojeto.

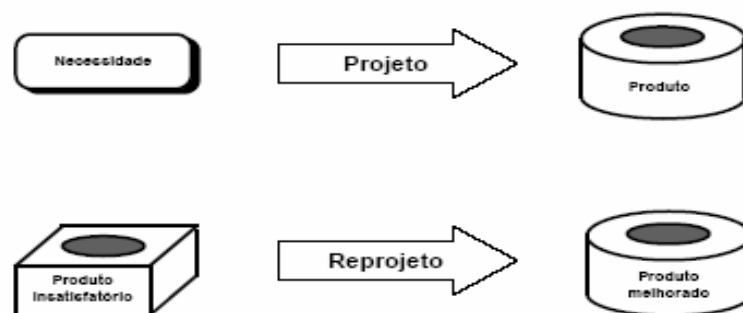


Figura 7.2: Diferença de conceituação entre projeto e reprojeto (Ferreira, 1997).

Exemplos de requisitos de projeto:

Custo direto de manutenção, confiabilidade da frota, disponibilidade da frota, custos indiretos de manutenção, tempos de manutenção.

Exemplos de especificações de projeto:

Custo de manutenção (3 R\$/Km), Confiabilidade (taxa de falha) 0,769, Disponibilidade, 0,91, Medidas de produtividade (98%).

7.4 Questionário utilizado na U-36

Conforme já mencionado anteriormente, o levantamento das necessidades do usuário pode ser efetuado a partir da elaboração de um questionário específico, cuja elaboração e tabulação dos seus resultados encontram-se discriminados a seguir.

7.4.1 O Questionário

Deve-se destacar que a U-36 não possui um bom registro sobre as ocorrências que provocaram as diversas paralisações verificadas ao longo da sua vida, sendo realizada esta pesquisa por meio de contatos com os integrantes das equipes de manutenção e operação a fim de se efetuar o levantamento dos problemas ocorridos anteriores ao ano de 2005, apesar de existir um sistema informatizado que permite realizar o levantamento dos tempos de paralisações da unidade, utilizado inclusive para o cálculo da sua taxa de disponibilidade durante o seu período de operação, não existe sistematização entretanto para se efetuar o registro das ocorrências e respectivas causas que provocaram estas paralisações.

Conforme já mencionado, as necessidades dos clientes e usuários são captadas principalmente com a utilização de questionários estruturados para os mesmos. No caso do reprojeto da U-36, a aplicação do questionário servirá para captar os principais problemas operacionais e de manutenção associados à baixa disponibilidade da U-36 que servirão de subsídio ao reprojeto da unidade.

Foi elaborado assim o questionário que se encontra no Anexo I constando o mesmo de 9 questões. O mesmo foi aplicado a 21 pessoas, representantes de todos os setores envolvidos com a operação, manutenção otimização e inspeção da U-36, ocupantes de funções como engenheiros, técnicos de operação, técnicos de manutenção e de inspeção na RLAM. A elaboração do questionário procurou explorar aqueles

pontos tidos como mais relevantes para a disponibilidade da U-36 abrangendo os assuntos relacionados com as hipóteses levantadas no capítulo 1 durante a estruturação do problema, e outros pontos também considerados importantes de acordo com a experiência do pessoal envolvida com estas atividades.

Visando-se esclarecer e identificar os assuntos tratados no questionário, a tabela 7.1 relaciona cada questão do mesmo com os referidos assuntos abordados.

Tabela 7.1: Resumo dos tópicos abordados no questionário aplicado na U-36.

QUESTÃO	TEMA ABORDADO, RELACIONADO COM A DISPONIBILIDADE DA U-36
01	Desvio em relação ao previsto, da vazão de gás ácido fornecida pela U-39;
02	Desvio quanto ao teor de H_2S da corrente de gás ácido fornecida à U-36;
03	Não adequação das correntes de gás ácido prevista, originadas nas U-6 e U-80, que impedem suas respectivas utilizações na U-36;
04	Identificação do sistema de reação térmica como aquele onde ocorre o maior problema de disponibilidade da U-36 (maior taxa de falhas);
05	Relação da experiência/conhecimento da equipe de operação atual com os problemas de disponibilidade da U-36;
06	Identificação de deficiência de projeto da U-36 com relação à impossibilidade de limpeza adequada da unidade após as paradas não-programadas, como uma das causas do problema de disponibilidade e manutenibilidade apresentadas;
07	Identificação do sistema de reação térmica como aquele que apresenta as maiores dificuldades de projeto para permitir a limpeza adequada da U-36 após as paradas operacionais;
08	Identificação da falta de operadores exclusivos à U-36 como uma das causas dos problemas de limpeza da unidade depois das paradas não-programadas;
09	Verificação se o plugueamento dos condensadores e caldeira de recuperação de calor, solução de reprojeto adotada até a presente data, foi suficiente para aumentar a disponibilidade da U-36;

Foi também apresentado no capítulo 3 um breve histórico contendo a evolução dos problemas da U-36 ao longo dos tempos, que permite obter uma melhor compreensão das questões citadas no questionário. Estas informações foram obtidas a partir de pesquisa não estruturada realizada com os membros da equipe de operação e de manutenção da U-36. Vale ressaltar entretanto que grande parte dos fatos e causas de

problemas citados pelo pessoal de operação e manutenção durante esta pesquisa sobre os problemas da unidade encontram-se respaldados no manual de operação da unidade bem como na literatura pesquisada sobre unidades de recuperação de enxofre.

7.4.2 Resultados obtidos com a aplicação do questionário

A tabela 7.2 apresenta um resumo dos resultados obtidos com a aplicação do referido questionário.

Vale salientar que tais resultados serviram para ratificar algumas das percepções, hipóteses e objetivos levantados no capítulo 1 desta dissertação.

Tabela 7.2: Tabulação dos resultados do questionário aplicado

QUESTÃO	OPÇÃO A	OPÇÃO B	OPÇÃO C
01	65%	25%	5%
02	60%	30%	10%
03	70%	25%	5%
04	100%	0%	0%
05	0%	14%	86%
06	96 %	4%	0%
07	95%	5%	0%
08	0%	10%	90%
09	100%	0%	0%

OPÇÃO A: Concordo integralmente com a afirmação contida na questão.

OPÇÃO B: Concordo parcialmente com a afirmação contida na questão.

OPÇÃO C: Não concordo com a afirmação contida na questão.

Esclarecendo-se os resultados apresentados na tabela 7.2, o 100% referente à opção A da questão 4 por exemplo, significa que todos os entrevistados concordaram integralmente com a afirmação contida na mesma.

Da pesquisa mencionada podem ser retiradas as seguintes conclusões:

- O Sistema de Reação Térmica foi identificado como aquele aonde residem os maiores problemas que afetam a disponibilidade da unidade. (questões 4 e 7)

- As questões relacionadas com a deficiência de projeto na limpeza da unidade após as paradas da U-36 foram apontadas como sendo o problema mais importante a ser solucionado para obtenção da disponibilidade prevista para a unidade (questões 6 e 7).
- A modificação realizada até a presente data, relativa ao plugueamento parcial dos tubos dos condensadores e caldeira de recuperação de calor, não obteve resultados satisfatórios quanto à melhoria da disponibilidade da unidade, reforçando a necessidade de realização de reprojeto conduzido por uma mudança da política de gestão da manutenção de acordo com o proposto no capítulo 6 (questão 9).
- A adequação da U-36 para possibilitar o recebimento do gás ácido das U-6 e U-80 nas condições atuais, ou o enquadramento do gás ácido produzido por estas últimas às condições previstas no projeto da U-36, ficaram em segundo lugar em ordem de prioridade como pontos para serem trabalhados visando-se a melhoria da disponibilidade da U-36 (questões 1, 2 e 3).
- A quantidade e o grau de capacitação dos operadores da U-36 foram descartados como causa do problema de disponibilidade analisado. (questões 5 e 8 cuja concordância integral com estas afirmações atingiu o percentual de 0%)
- Quanto às observações registradas nos questionários aplicados, destacam-se a que menciona a falta de um compressor de ar de combustão exclusivo e independente para a U-36, e a necessidade de se automatizar a tarefa para realização da inertização e limpeza da U-36, após uma parada não programada, como as principais ações necessárias à melhoria da disponibilidade desta unidade.

7.5 Análise da FMECA da U-36

Foi realizada a análise dos modos de falha das principais ocorrências verificadas na U-36 durante o período desde o início da sua operação de acordo com os dados levantados pelas equipes de manutenção e operação. Para tal foi aplicada a ferramenta FMECA citada no capítulo 4 desta dissertação, visando-se além da obtenção da análise daqueles modos de falha que mais têm contribuído para a baixa disponibilidade da U-36, obter-se a partir das falhas e respectivas ações de correção definidas com esta ferramenta, as informações necessárias à etapa do projeto

informacional, representadas neste caso como os requisitos de projeto, que servirão como entrada para elaboração do reprojeto proposto para a U-36, conforme será visto a seguir. Para tal, foi formado um grupo de seis pessoas representando os setores da RLAM de Manutenção, Operação e Engenharia de Processos. Vale-se ainda ressaltar que foi utilizada a análise funcional da U-36 realizada no capítulo 5 desta dissertação, como uma das fontes de dados de entrada para a realização da FMECA. O Anexo II apresenta a planilha da FMECA realizada contendo os modos de falha e respectivos efeitos e ações recomendadas.

Os modos de falha se referiram à perda de funções de acordo com a análise funcional desenvolvida no Capítulo 5 desta dissertação. A referida FMECA tratou dos modos de falha que na visão do grupo, contribuíram para a redução da disponibilidade da unidade, não abrangendo deste modo todas as funções existentes, e sim apenas aquelas cujos desvios estão relacionados com a baixa disponibilidade verificada e que de acordo com os objetivos da dissertação, serão objetos do reprojeto proposto.

Quanto a escala dos parâmetros (severidade, detecção e ocorrência) para determinação do NPR, foi utilizada a mesma definida no capítulo 4 desta dissertação.

7.5.1 Comentários sobre as causas e ações recomendadas identificadas na FMECA

De acordo com o Anexo II, existem 4 funções cujos desvios estão mais associados ao problema de disponibilidade analisado. São elas:

- Condensar o enxofre e permitir o fluxo livre do mesmo através dos equipamentos sem poluir o meio-ambiente.
- Converter em enxofre o SO_2 que sai dos pré-aquecedores.
- Converter em SO_2 um terço do H_2S presente na corrente de gás ácido enviado à U-36.
- Bombear o enxofre líquido do tanque F-3611 de armazenamento no interior da unidade para o pátio externo de armazenamento de enxofre.

Para as referidas funções foram apresentados os seus respectivos modos de falha, causas, controles e ações recomendadas. Seguem a seguir alguns comentários mais detalhados sobre os itens considerados mais relevantes para o problema em questão.

a) Quanto à função “Condensar o enxofre e permitir o fluxo livre do mesmo através dos equipamentos sem poluir o meio-ambiente” o modo de falha apresentado foi a perda de escoamento através dos condensadores. Para o mesmo dois efeitos foram verificados:

a.1) Perda de escoamento no interior dos condensadores

a.2) Perda de escoamento a jusante dos condensadores.

Em ambos os casos, a perda de escoamento é decorrente da obstrução proveniente da solidificação do enxofre. As causas detectadas para a perda no interior dos condensadores (item a.1 acima) encontram-se listadas abaixo:

1.1.1) Temperatura do enxofre mais baixa que a especificada devido à baixa vazão de gás ácido.

1.1.2) Resíduo de enxofre solidificado no interior de linhas e equipamentos após a parada da unidade.

1.1.3) Inclinação inadequada das linhas e dos condensadores com relação ao sentido de fluxo de gás ácido.

1.1.4) Condensadores mal dimensionados acarretando velocidades de fluxo mais baixas que a especificada.

1.1.5) Danos dos demisters (telas) existentes na saída dos condensadores.

1.1.6) Temperatura do gás ácido mais baixa que a especificada devido ao baixo teor de H_2S do gás ácido empregado.

Para o caso da temperatura mais baixa (item 1.1.1 acima), os controles e ações citados na FMECA passam principalmente pela automatização do controle de vazão a partir da variável “temperatura de saída do enxofre no quarto condensador” controlando-se a vazão de gás ácido enviada com a instalação de uma válvula de controle de fluxo de gás no acumulador de gás ácido (F-3601) localizado na entrada da unidade, comandada pela variável de temperatura de saída do quarto condensador. Quanto ao aumento da vazão de gás ácido obtido a partir da utilização das correntes de gás ácido originadas das unidades U-6 e U-80 não utilizadas devido ao não enquadramento das mesmas quanto à especificação definida, a solução mais viável encontrada está na criação de acumuladores específicos na entrada da unidade para recebimento de cada uma destas correntes, aonde seria feito o controle de suas respectivas especificações, só liberando-as para utilização na U-36 após a comprovação das suas respectivas conformidades com as especificações definidas. Obviamente que também a solução externa à U-36 para

este caso está na alteração dos processos internos em cada uma das unidades referidas (U-6 e U-80) visando a adequação da especificação dos seus respectivos gases ácidos.

Esta medida passa por alterações nas unidades citadas que fogem aos objetivos deste trabalho, devendo entretanto ser mencionada neste trabalho, devido à sua forte relação com a solução do problema proposto.

Já as ações referentes ao problema de obstrução decorrente da solidificação do enxofre após a parada da unidade (item 1.1.2 acima) estão associadas diretamente com a etapa de inertização e limpeza da unidade, prevista após qualquer parada numa unidade de recuperação de enxofre. Neste caso, a ação recomendada referente à instalação de compressores de combustão interna na própria unidade, foi a que obteve maior pontuação (maior NPR) de acordo com a FMECA realizada, adquirindo assim esta informação a maior importância dentre as demais quanto a sua necessidade de detalhamento num reprojeto da U-36, visando a solução do problema proposto. Isto se deve ao entendimento da equipe que compôs a FMECA que as maiores paralisações ocorridas na U-36 foram devidas ao fato de que esta etapa deixou de ser realizada, uma vez que estas paralisações foram decorrentes de paralisações ocorridas na U-39 (principal fornecedora de gás ácido à U-36), o que acarreta também a paralisação do compressor de gás ácido pertencente a esta última unidade, impossibilitando deste modo a realização da tarefa de inertização e limpeza interna das linhas e equipamentos da U-36, o que mantém resíduos de enxofre no sistema que ao se solidificarem com o resfriamento da unidade, obstruem o fluxo durante o retorno à operação da U-36.

Outro ponto também verificado foi quanto à baixa manutenibilidade da U-36 o que acarreta longos períodos de manutenção até o restabelecimento da sua condição operacional durante os reparos provenientes do problema de obstrução citado. Para este caso, as ações recomendadas passam pela necessidade de se viabilizar a drenagem adequada do interior dos equipamentos, com a instalação de drenos e bloqueios apropriados nos pontos mais baixos e de maior dificuldade de circulação, visando-se facilitar a limpeza no interior dos equipamentos e linhas. Além disto devem ser previstas a criação de tomadas para injeção de ar de combustão nos pontos críticos mais sujeitos a obstrução devido à solidificação de enxofre, criando-se deste modo a possibilidade de facilitar a desobstrução nestes pontos.

Quanto à causa decorrente da inclinação inadequada das linhas (item 1.1.3 acima) para a qual se obteve o NPR de 128, as ações passam pela verificação e garantia

de que a inclinação das linhas e equipamentos em relação ao sentido de fluxo de gás ácido é de 1/4" (um quarto de polegada) para cada pé de comprimento verificado. Esta ação passa pela verificação dimensional nas instalações físicas atuais e execução de correções, caso necessário.

O item relativo ao dimensionamento dos condensadores em relação à vazão real de gás ácido (1.1.4 acima) possui duas ações recomendadas, sendo que aquela relativa à instalação de visores em cada condensador visa possibilitar que o pessoal de operação possa ter uma confirmação visual quanto aos valores indicados pelos medidores de vazão instalados, possibilitando melhorar o controle sobre a vazão em cada condensador, agilizando as ações de correção no processo quando necessário. Já a segunda ação relativa a este item, ou seja, a verificação do dimensionamento da área de troca dos condensadores em relação à vazão de gás ácido real prevista, obteve o NPR de 192, já tendo sido realizada pela equipe do Cenpes da Petrobras, tendo sido confirmado um dimensionamento dos mesmos acima da capacidade real existente, o que provocava velocidades de fluxo inferiores e temperaturas mais baixas que as previstas, acarretando a solidificação do enxofre nestes equipamentos durante a operação da unidade. Foi adotado assim o plugueamento (instalação de plugs em alguns tubos nos espelhos dos condensadores, isolando-os) o que possibilitou a melhoria do problema durante a operação da unidade devido ao aumento obtido para a velocidade de fluxo nos condensadores. Esta solução entretanto é tida como paliativa, devendo ser realizada a aquisição de condensadores menores compatíveis com o dimensionamento efetuado, uma vez que o próprio plugueamento pode ser uma fonte de problemas futuros.

Já o item relativo às falhas nos demisters, telas localizadas na entrada dos condensadores e que funcionam como espécies de filtros para conterem partículas estranhas ao fluxo de gás, obteve NPR igual a 128, estando dentre as ações recomendadas tanto a necessidade de verificação do correto dimensionamento das mesmas, como até da sua real necessidade, uma vez que numa das falhas ocorridas por obstrução destas telas em um dos condensadores, a mesma foi removida definitivamente, vindo o referido condensador a operar com uma menor perda de carga e conseqüentemente, temperaturas mais elevadas que os demais que continuam com os respectivos demisters, estando assim menos sujeito a obstrução de enxofre devido solidificação. Já as ações recomendadas relativas ao item 1.1.6 acima (temperatura do gás ácido mais baixa que a especificada devido ao seu baixo teor de H_2S) passam pela

criação de um sistema de controle do gás ácido recebido na U-36 por cada uma das unidades fornecedoras deste gás, destacando-se a criação de tambores armazenadores individualizados na entrada da U-36 para cada uma das correntes de gás ácido enviadas, com capacidade de reenvio daquelas correntes que não atendam à especificação de gás ácido para reprocesso.

Com relação ao efeito de obstrução após os condensadores analisado na FMECA, os mecanismos de falha analisados de acordo com o anexo II são os seguintes:

1.2.1) Corrosão nos tubos dos condensadores.

1.2.2) Falha na junta do cabeçote.

1.2.3) Falha na solda de selagem tubo-espelho do condensador devido à corrosão.

Os condensadores são compostos basicamente de tubos em aço inoxidável ferrítico AISI 410 e espelhos em aço inox martensítico AISI 410S. Estes materiais possuem coeficientes de dilatação muito próximos, sendo também ambos os materiais considerados como de difícil soldabilidade (Teles,1986). Apresentam de modo geral uma resistência a corrosão inferior ao dos aços inoxidáveis austeníticos, e em relação aos meios sulfurosos, apresentam resistência a corrosão em temperatura ambiente um pouco superior ao dos aços-carbonos. Apesar de não ter feito parte da revisão bibliográfica desta dissertação, o tema de corrosão e propriedades físicas dos aços inoxidáveis martensíticos e ferríticos está sendo aqui mencionado devido aos mecanismos de falhas discutidos na FMECA em relação aos itens dos condensadores, aonde foram citados problemas de corrosão nos tubos e nas soldas de selagem tubo-espelho.

O problema de corrosão nos tubos dos condensadores tem a sua origem decorrente do problema de deficiência de limpeza e inertização da unidade após as paradas, o que conforme já mencionado, leva à formação de H_2SO_4 no interior destes tubos. Devido à baixa resistência dos aços inox ferríticos a esta substância mesmo a temperaturas ambientes, este fato provoca a corrosão e falha destes tubos, que acarreta mais vazamentos, dificultando assim o retorno à operação da unidade, em razão da necessidade de realização de reparos de grande monta nos condensadores. Já a corrosão apresentada pelas soldas de selagem tubo-espelho deve-se além do problema de corrosão por H_2SO_4 citado, ao agravamento decorrente da dificuldade de soldagem entre estes materiais. Assim sendo a ação recomendada para este problema passa pela substituição da especificação dos materiais tanto do tubo como do espelho para aço-

carbono, em função do pressuposto de que a causa básica do problema estará sendo eliminada com a melhoria do processo de limpeza e inertização da unidade, obtida com a implantação de compressores de ar de combustão próprios a U-36. Deste modo, a substituição dos materiais dos tubos e espelhos dos condensadores por aço-carbono conforme ação recomendada pela equipe da FMECA, irá conferir uma maior facilidade de manutenção, já que os ganhos decorrentes da proteção à corrosão pelo uso do aço inox ferrítico/martensítico não são tão determinantes para o estabelecimento da confiabilidade da unidade. Por outro lado, a maior facilidade de manutenção, redução dos custos em decorrência de uso de materiais mais baratos, e aplicação de materiais com uma maior facilidade de soldagem, bem como na eventualidade de se necessitar instalarem plugs, conferem à utilização de aço-carbono uma melhoria na manutenibilidade da unidade.

Quanto ainda ao problema de falha na solda de selagem tubo-espelho do condensador, o uso de aço-carbono irá implicar na utilização de tubos e espelhos com espessuras superiores às utilizadas originalmente com aço inox, o que implicará no redimensionamento da solda de selagem entre ambos, devendo assim a mesma ser redimensionada para atender a esta alteração de projeto, o que também irá conferir uma maior confiabilidade a este componente.

Já a ação recomendada para o item 1.1.2 acima (falha da junta do cabeçote) passa pela alteração do projeto da junta atualmente usada, adotando-se a junta do tipo maciça serrilhada também em aço-carbono, mais adequada para a garantia contra vazamentos em trocadores de calor (Veiga, 2003).

Convém ainda ressaltar que as ações recomendadas para o desvio de perda de circulação através da caldeira de recuperação de calor devido à temperatura do enxofre mais baixa que a especificada, são similares às propostas para este tipo de problema ocorrido com os condensadores, ou seja:

- Criação de um sistema de armazenamento de gás ácido individualizado para cada uma das unidades fornecedoras (Unidades 6, 39 e 80) em tambores na entrada da U-36, com capacidade de controle das respectivas vazões e devolução para reprocesso das parcelas fora de especificação.
- Controlar pressão dos tambores de armazenamento de gás ácido mantendo-a dentro dos valores previstos no projeto da unidade.

- Checar a caldeira de recuperação de calor quanto ao correto dimensionamento da sua área de troca em relação ao fluxo previsto de gás ácido.

Os comentários referentes às ações citadas acima são similares aos realizados para os itens 1.1.1 e 1.1.6.

7.5.2 Análise dos resultados da FMECA

Baseando-se na experiência da equipe que compôs a FMECA foi definido o critério para definição da importância das ações recomendadas no anexo II com relação às suas respectivas efetividades para solução do problema proposto na dissertação. O critério utiliza o valor encontrado para o NPR de cada ação como indicador da importância para as ações mencionadas. A tabela 7.3 estabelece o critério citado.

Tabela 7.3: Efetividade das ações recomendadas X NPR

Efetividade da ação recomendada	Valor do NPR
Forte	$648 \geq \text{NPR} \geq 192$
Média	$192 > \text{NPR} \geq 128$
Fraca	$\text{NPR} < 128$

De acordo com o critério estabelecido, as ações que possuem o valor do NPR entre 648 e 192 (inclusive) terão um forte impacto sobre a solução do problema proposto. Já as ações cujos NPR's situam-se entre 192 e 128 possuem uma efetividade média. Já aquelas com NPR's inferiores a 128 terão uma fraca efetividade em relação à solução do problema proposto.

A tabela 7.4 apresenta um resumo dos resultados obtidos no Anexo II relacionando os NPR's obtidos em ordem decrescente juntamente com as suas respectivas causas, controles e ações recomendadas. Conforme já demonstrado no capítulo 4, o NPR representa a resultante do produto dos valores atribuídos pela equipe que compõe a FMECA aos fatores de “severidade”, “ocorrência” e “detecção” a cada um dos fatores analisados. O NPR orientará deste modo a priorização na escolha dos requisitos de projeto que forem originados de soluções referentes aos respectivos modos de falha associados, conforme será visto adiante.

Tabela 7.4: Resumo da FEMECA da U-36.

Causa	Controle	Ação recomendada	NPR
Resíduo solidificado decorrente de limpeza deficiente durante parada da unidade;	Melhoria no processo de limpeza da unidade durante as paradas;	Instalar compressor de ar de combustão pertencente à própria U-36	648
Resíduo solidificado decorrente de limpeza deficiente durante parada da unidade;	Melhoria no processo de limpeza da unidade durante as paradas;	Possibilitar a drenagem adequada do interior dos equipamentos com a instalação e drenos e bloqueios apropriados nos pontos mais baixos e de maior dificuldade de circulação, visando-se facilitar a limpeza no interior dos mesmos	288
Corrosão nos tubos dos condensadores;	Especificação dos materiais do feixe tubular;	Alterar a especificação do material dos feixes e espelhos dos condensadores para aço-carbono,	288
Falha na solda de selagem tubo-espelho do condensador devido à corrosão;	Projeto da junta de selagem por solda tubo-espelho dos condensadores	Alterar o projeto da solda de selagem, reforçando-a e adequando-a à nova especificação dos materiais do espelho e tubos do feixe (aço-carbono)	192
Temperatura do enxofre mais baixa que a especificada devido à baixa vazão de gás ácido	Ajuste da temperatura através do controle da vazão do gás ácido	Ajustar válvula de controle de fluxo de gás ácido na saída do acumulador F-3601 em função da temperatura de saída do quarto condensador	192
Temperatura do enxofre mais baixa que a especificada devido à baixa vazão de gás ácido	Ajuste da temperatura através do controle da vazão do gás ácido	Controlar pressão do tambor de gás ácido F-3601 mantendo-a dentro dos valores previstos no projeto da unidade	192
Idem anterior	Idem anterior	Viabilizar o aumento de vazão de gás ácido a partir da adequação das correntes não utilizadas da U-6 e U-80	192

Tabela 7.4: Resumo da FEMECA da U-36 (cont.).

Causa	Controle	Ação recomendada	NPR
Condensadores mal dimensionados acarretando velocidades de fluxo mais baixas que a especificada;	Verificar o dimensionamento dos condensadores segundo as vazões de gás ácido previstas em projeto	Checar os condensadores quanto ao correto dimensionamento da sua área de troca em relação ao fluxo previsto de gás ácido	192
Temperatura do gás ácido mais baixa que a especificada devido ao baixo teor de H ₂ S do gás ácido empregado	Análise do teor de H ₂ S em cada uma das correntes de gás ácido enviadas à U-36;	Instalar sistema para efetuar análise individualizada quanto ao teor de H ₂ S para as correntes de gás ácido das unidades 6, 39 e 80, condicionando os seus envios à U-36 apenas quando estiverem de acordo com a especificação prevista;	192
Temperatura do gás ácido mais baixa que a especificada devido ao baixo teor de H ₂ S do gás ácido empregado	Análise do teor de H ₂ S em cada uma das correntes de gás ácido enviadas à U-36;	Criação de um sistema de armazenamento de gás ácido individualizado na entrada da U-36 para cada uma das unidades fornecedoras, com capacidade de desvio para reprocesso das parcelas fora de especificação	192
Falha na solda de selagem tubo-espelho do condensador devido à corrosão;	Projeto da junta de selagem por solda tubo-espelho dos condensadores	Alterar o projeto da solda de selagem, reforçando-a e adequando-a à nova especificação dos materiais do espelho e tubos do feixe	192
Temperatura do enxofre mais baixa que a especificada	Dimensionamento da caldeira de recuperação em relação à vazão prevista de gás ácido	Checar a caldeira de recuperação de calor quanto ao correto dimensionamento da sua área de troca em relação ao fluxo previsto de gás ácido.	192

Tabela 7.4: Resumo da FMECA da U-36 (cont.).

Causa	Controle	Ação recomendada	NPR
Inclinação inadequada das linhas e dos condensadores com relação ao sentido de fluxo de gás ácido	Inclinação das linhas e dos condensadores	Checar se inclinação das linhas e condensadores no sentido de fluxo são de ¼ de polegada por pé de comprimento considerado	128
Condensadores mal dimensionados acarretando velocidades de fluxo mais baixas que a especificada	Verificação da velocidade de fluxo através de visores instalados nos equipamentos	Instalar visores de fluxo nos condensadores para permitir melhor controle de vazão em cada um dos condensadores	128
Danos dos demisters (telas) existentes na saída dos condensadores;	Análise dos demisters localizados na saída dos condensadores	Verificar efetividade do sistema de fixação dos demisters	128
Danos dos demisters (telas) existentes na saída dos condensadores;	Análise dos demisters localizados na saída dos condensadores	Verificar adequação do “mesh” dos demisters utilizados	128
Danos dos demisters (telas) existentes na saída dos condensadores;	Análise dos demisters localizados na saída dos condensadores	Confirmar real necessidade de existência de demisters em projetos de unidades de recuperação e enxofre	128

Conforme pode ser observado da tabela 7.4 dentre os dois maiores NPR's obtidos com a FMECA, a melhoria do processo de limpeza e hibernação da unidade 36 após as paradas não programadas, foi apontado como o controle mais importante para possibilitar a correção dos modos de falha que têm afetado as funções dos equipamentos do sistema de reação térmica da U-36 (notadamente os condensadores e reatores). Destaca-se o elevado NPR encontrado para ação de instalação de compressores de ar de combustão próprios à U-36 que chega a ser mais que o dobro em relação ao NPR da ação imediatamente inferior. Tal resultado é atribuído principalmente às elevadas quantidades de ocorrências e dificuldades de detecção do modo de falha “obstrução dos condensadores” relacionado à causa raiz decorrente da presença de resíduos de enxofre originados pela falta de limpeza da unidade após uma parada, que impedem a livre circulação através dos mesmos no retorno à operação da unidade. Conforme já

mentionado, este fato é devido à impossibilidade de realização da limpeza obrigatória após a parada da U-36 em decorrência da mesma não dispor de compressores de ar de combustão próprios, uma vez que o único disponível é pertencente à U-39, tornando-se inoperante juntamente com a paralisação desta unidade que também provoca a paralisação da U-36. A ação recomendada para o referido controle citado deverá merecer portanto uma atenção especial quanto às soluções propostas nas especificações do reprojeto. (o NPR encontrado para este item chega a ser aproximadamente 65% do máximo permitido pela metodologia de FMECA utilizada).

A criação de mecanismos capazes de permitir a drenagem dos equipamentos e linhas após as paradas de manutenção facilitando o processo de limpeza bem como a instalação de drenos e bloqueios para permitirem tais ações, foi a segunda ação recomendada ligada ao controle de limpeza e inertização da unidade.

A especificação dos materiais dos feixes tubulares dos condensadores e caldeira foi outro controle identificado como muito forte para melhoria da disponibilidade da U-36, destacando-se a substituição dos materiais atualmente utilizados nestes componentes (aços inox ferríticos e martensíticos) por aço-carbono com aumento de espessura desses componentes, o que conferirá melhor resultado no processo de soldagem destes materiais, preservando a resistência à corrosão necessária na temperatura requerida atual. Outros controles foram diagnosticados destacando-se também o ajuste da temperatura nos equipamentos do sistema de reação térmica por meio do controle de vazão de gás ácido e/ou aumento de teor de H_2S , já citados anteriormente neste mesmo item.

Foi ainda estabelecido pela equipe que realizou a FMECA que só os controles obtidos com NPR's maiores ou iguais a 128 serão considerados para análise como requisitos de usuário, com vistas à elaboração da lista de especificação prevista na etapa do projeto informacional. Tal fato se deve à avaliação da equipe de que os NPR's menores que 128 não representam mecanismos de falha significativos com vistas à melhoria da disponibilidade pretendida para a U-36.

Os resultados obtidos com a realização da FMECA ratificam e reforçam as questões levantadas com a aplicação do questionário referido no item anterior deste capítulo, quanto à necessidade de melhorias no sistema de limpeza e hibernação da U-36 após as paradas desta unidade. Houve também uma coincidência entre as prioridades detectadas tanto nos questionários como na FMECA, quanto à importância da influência

do controle de temperatura dos condensadores, obtida por meio do controle de vazão de gás ácido e/ou teor de H_2S enviado para a U-36, referente ao modo de falha de obstrução nos condensadores, permanecendo este controle em ambas aplicações num patamar secundário de importância em relação à necessidade de melhoria no sistema de limpeza e hibernação da U-36 durante as paradas desta unidade.

7.6 Requisitos dos usuários e de projeto para a U-36

A escolha das necessidades para conversão em requisitos dos usuários, de acordo com a metodologia do NEDIP apresentada, foi originada a partir dos pontos considerados mais relevantes obtidos do questionário aplicado bem como dos controles listados na FMECA realizada. Além disto, foram listados alguns requisitos baseando-se na experiência do pessoal envolvido com as atividades de manutenção, operação e engenharia desta unidade. Deste modo foram listados os seguintes requisitos dos usuários relacionados com o reprojeto proposto da U-36:

1. Criação de mecanismos operacionais capazes de realizar a limpeza e hibernação da unidade após as paradas programadas e não-programadas da unidade.
2. Melhoria da flexibilidade operacional da U-36 a partir da adequação do gás ácido das U-6 e U-80 às condições estabelecidas no projeto da U-36 aumentando a vazão de gás ácido fornecida à U-36.
3. Equipamentos e linhas da unidade inclinação adequada em relação ao sentido de fluxo de enxofre.
4. Dimensionamento adequado dos condensadores e demais equipamentos do sistema de reação térmica em relação às vazões existentes de gás ácido.
5. Projeto e montagem adequados dos demisters dos condensadores e reatores.
6. Condensadores e caldeira de recuperação de calor possuírem especificação adequada para os materiais dos seus internos.
7. Melhorar o controle do teor de hidrocarbonetos (HC) do gás ácido fornecido, mantendo-o dentro dos limites estabelecidos e melhorando a coloração do enxofre produzido.
8. Operar a U-36 com uma disponibilidade de 90%.
9. Operar a U-36 com um custo de manutenção anual de R\$1.800.000,00.

10. Possuir uma manutenibilidade adequada a estes tipos de unidade reduzindo-se os tempos das intervenções de manutenção realizadas.
11. Operar a U-36 de modo que se reduza o envio para atmosfera de compostos a base de enxofre originados do processamento de petróleo.

7.6.1 Requisitos de projeto necessários para a U-36

A conversão dos requisitos dos usuários em requisitos de projeto conforme previsto na metodologia do NEDIP, foi obtida a partir da experiência da equipe consultada, bem como da pesquisa aos manuais de operação, folha de dados de equipamentos e literatura técnica existente referente a unidades de recuperação de enxofre. Os requisitos de projeto definidos estão também relacionados com os pontos identificados no questionário e FMECA aplicados. Deste modo foram listados os seguintes requisitos de projeto:

1. Existência de dispositivos que permitam a drenagem de enxofre nas linhas e equipamentos.
2. Inclinação adequada no sentido do fluxo de enxofre das linhas e equipamentos.
3. Existência de múltiplos sopradores de ar pertencentes à própria unidade.
4. Isolamento térmico adequado dos equipamentos, tubulação e seus acessórios com atenção especial aos flanges e válvulas.
5. Dispor os tampos dos condensadores de dispositivos que possibilitem acesso completo aos espelhos para possibilitar a sua desobstrução, caso necessário.
6. Dispor os condensadores de dreno de enxofre localizado na porção inferior dos mesmos, devidamente encamisado com vapor.
7. Existência de visores de fluxo de enxofre individuais localizados nos próprios condensadores.
8. Projeto e montagem adequados para os *demisters* dos condensadores e reatores.
9. Presença de termopares nos reatores para monitoramento adequado da temperatura de enxofre.

10. Instalação de válvulas de controle de fluxo de gás ácido nos tambores de armazenamento de gás ácido localizados na entrada da U-36, sendo as mesmas operadas em função da temperatura de saída do gás ácido do quarto condensador.
11. Condensadores e caldeira de recuperação devem estar com os seus dimensionamentos compatíveis com as vazões e temperaturas requeridas de projeto.
12. Instalar sistema individualizado para controle de controle do teor de H_2S para cada uma das correntes de gás ácido fornecida à U-36.
13. Instalar na entrada da U-36 tambores de armazenamento individualizados para as correntes de gás ácido fornecidas pelas unidades 6,39 e 80.
14. Alterar para aço-carbono a especificação dos componentes da caldeira de recuperação de calor e dos condensadores.
15. Criação de sistema de controle contínuo da especificação de cada uma das correntes de gás ácido enviadas à U-36 quanto ao teor de HC.

A tabela 7.5 apresenta a relação entre os requisitos dos usuários versus requisitos de projeto a fim de facilitar a priorização e definição da especificação de reprojeto requerida para a fase do projeto informacional. Vale salientar que os números citados relativos aos requisitos de projeto nesta tabela se referem aos itens da relação dos requisitos de projeto apresentada no item 7.6.1 desta dissertação.

Tabela 7.5: Requisitos do usuário X Requisitos de projeto da U-36.

REQUISITOS DOS USUÁRIOS	NPR	REQUISITOS DE PROJETO
Criação de mecanismos operacionais capazes de realizar a limpeza e hibernação da unidade após as paradas programadas e não-programadas da unidade	648	1; 3; 5; 6
Melhoria da flexibilidade operacional da U-36 a partir da adequação do gás ácido das U-6 e U-80 às condições estabelecidas no projeto da U-36.	192	10;12;13
Equipamentos e linhas da unidade possuírem inclinação adequada em relação ao sentido de fluxo de enxofre.	128	2
Dimensionamento adequado dos condensadores e demais equipamentos do sistema de reação térmica em relação às vazões existentes de gás ácido.	128	11
Projeto e montagem adequados dos demisters dos condensadores e reatores	128	8; 9
Condensadores e caldeira de recuperação de calor possuírem especificação adequada para os materiais dos seus internos	288	14
Melhorar o controle do teor de hidrocarbonetos (HC) do gás ácido fornecido, mantendo-o dentro dos limites estabelecidos e melhorando a coloração do enxofre produzido.	192	12;13;15
Operar a U-36 com uma disponibilidade de 90%.	192	1; 2; 3; 4;...;14
Operar a U-36 de modo que se reduza o envio para atmosfera de compostos a base de enxofre originados do processamento de petróleo.	192	1; 2; 3; 4;...;14

7.6.2 Estabelecimento dos requisitos de projeto a partir da ferramenta QFD

No item anterior, a escolha e hierarquização dos requisitos de projeto foram obtidas com a utilização da ferramenta FMECA conforme já comentado. Visando-se comparar estes resultados com o obtido a partir da utilização da ferramenta QFD (“Quality Function Deployment”), também chamada de Casa da Qualidade, originalmente utilizada para esta finalidade pela metodologia de projeto do NEDIP, serão definidas a hierarquização dos requisitos de projeto a partir da utilização da referida ferramenta. O QFD apóia a equipe de projeto na sistematização das informações sobre as necessidades e requisitos de projeto, procurando compreender “o que” os clientes querem do produto e determinar “como” é possível satisfazer estas necessidades do melhor modo e com os recursos disponíveis. (Ogliari; Perez, 2006).

Na presente aplicação neste item, não serão consideradas as avaliações do telhado da Casa da Qualidade, de acordo com uma das possibilidades de aplicação previstas por Ogliari (1999).

A tabela 7.6 traz o relacionamento verificado entre os requisitos do usuário e requisitos de projeto (foram utilizadas as numerações definidas para os mesmos nos itens 7.6 e 7.6.1 respectivamente). De acordo com a referida tabela, os requisitos de projeto de números 3, 11, 14 e 2 respectivamente (ver item 7.6.1) foram aqueles considerados de maior importância para o reprojeto de acordo com esta ferramenta, enquanto que segundo a hierarquização obtida com a FMECA, foram encontrados os requisitos de projeto 1, 3, 5 e 6 conforme resultados apresentados na tabela 7.5. Em ambos os casos, a necessidade de existência de múltiplos sopradores de ar de combustão pertencentes à própria U-36 (requisito de projeto número 3) foi indicado, o que confirma assim ser este o requisito mais importante a ser implementado no reprojeto da U-36 para obtenção da melhoria da disponibilidade desta unidade. Convém mencionar ainda que os 4 principais requisitos citados, obtidos a partir da utilização do QFD, foram utilizados para obtenção da lista de especificação obtida a partir da FMECA, conforme será visto adiante, o que demonstra a consistência entre as duas ferramentas citadas, apesar das diferentes priorizações encontradas para os respectivos requisitos de projeto.

Tabela 7.6: Relacionamento entre os Requisitos do usuário e Requisitos de projeto da U-36 segundo ferramenta QFD.

PESOS (*)		REQUISITOS DE PROJETO														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
R E Q U I S I T O S D O U S U Á R I O	1	2	1	3	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	3	3	0	2
	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	3	0	0	0	0
	5	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	1	0	0	0	0
	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0
	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2	2	0	3
	8	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1
	9	1	1	3	1	2	1	1	1	1	1	2	1	1	2	1
	10	2	1	3	1	2	1	1	1	0	0	1	0	0	2	0
	11	1	2	2	1	0	1	1	2	2	2	2	2	2	2	1
TOTAL		7	10	13	4	7	7	4	8	4	9	11	9	9	10	8

***PESOS**

0:Relacionamento "Nulo" entre requisitos do usuário e requisitos de projeto.

1:Relacionamento “Fraco”.

2: Relacionamento “Médio”.

3: Relacionamento “Forte”.

7.7 Elaboração da lista de especificação para o reprojeto da U-36

A lista de especificação será formada pelos requisitos de projeto que estão mais relacionados com o atendimento das necessidades mais relevantes. Tal verificação se dará com o auxílio da ferramenta FMECA a partir da identificação dos maiores NPR's verificados, conforme demonstrado na tabela 7.5. Assim sendo, de acordo com os resultados apresentados, os requisitos de projeto relacionados com os maiores NPR's

serão aqueles que originarão as especificações mais importantes, cujos detalhamentos e implementações previstas nas etapas seguintes à informacional, de acordo com a metodologia de projeto apresentada, irão atender às necessidades para melhoria da disponibilidade operacional da U-36. Conforme já mencionado serão listadas apenas as especificações relacionadas com NPR's maiores ou iguais a 128 (ponto de corte definido pela equipe a partir da análise da importância dos itens mencionados). As referidas especificações já estão listadas segundo a prioridade definida pela metodologia aplicada e de acordo como os seus respectivos graus de importância para melhoria da disponibilidade da U-36.

Segue assim a lista de especificações obtida com o critério citado acima:

1. Existência de sopradores de ar de combustão compatíveis com a vazão requerida pelo processo e pertencentes à própria U-36 (relativo ao requisito de projeto 3).
2. Dispor as linhas e condensadores de drenos para o enxofre líquido, devidamente posicionados e dimensionados (relativo aos requisitos de projeto 1 e 6).
3. Dispor os tampos dos condensadores de dispositivos que possibilitem acesso completo ao espelho sem a necessidade de desmontagem dos mesmos, a fim de possibilitar a agilização de limpezas e desobstruções eventualmente necessárias (relativo ao requisito de projeto 5).
4. Dispor os condensadores de drenos de enxofre localizados na porção inferior dos mesmos devidamente encamisados com vapor (requisito de projeto 1).
5. Alterar de aço inox ferrítico e martensítico para aço-carbono a especificação dos componentes (feixe-tubular e espelho) dos condensadores e caldeira de recuperação de calor (requisito de projeto 14).
6. Instalação de válvulas de controle de fluxo de gás ácido nos tambores de armazenamento de gás ácido localizados na entrada da U-36, sendo as mesmas operadas em função da temperatura de saída do gás ácido do quarto condensador (requisito de projeto 10).
7. Instalar na entrada da U-36 tambores de armazenamento individualizados para as correntes de gás ácido fornecidas pelas unidades 6, 39 e 80 permitindo um melhor controle das especificações de gás ácido recebidas (requisitos de projeto 12 e 13).

8. Criação de um sistema para controle contínuo da especificação de cada uma das correntes de gás ácido quanto ao teor de hidrocarbonetos de todas as correntes enviadas à U-36 durante o envio (requisito de projeto 15).
9. Manter todas as linhas de vapor e equipamentos com uma inclinação de 1/8 a 1/4 de polegada por pé de comprimento, na direção do fluxo de saída do enxofre, para permitir uma maior facilidade de escoamento e drenagem do enxofre líquido (requisito de projeto 2).
10. Substituir os condensadores e caldeira de recuperação de calor por equipamentos com dimensões compatíveis com as vazões reais obtidas a partir do fornecimento de gás ácido de todas as unidades previstas em projeto (requisito de projeto 11).
11. As telas inferiores de suportes de catalisador dos reatores devem ser de um *mesh* 4x4. Já as telas superiores de suportes dos reatores, devem ter *mesh* de 8 x 8 (requisito de projeto 8).
12. Existência de no mínimo nove termopares por reator, localizados a 25%, 50% e 75% dos comprimentos e profundidades dos leitos para permitir um melhor controle de temperatura da fase de reação térmica (requisito de projeto 9).

Vale ainda ressaltar que a questão citada da melhoria da flexibilidade operacional da U-36 a partir da adequação do gás ácido da U-80 será obtida a partir de alterações operacionais na referida U-80, não sendo incluídas portanto como especificações de reprojeto para a U-36.

7.8 Considerações finais

A etapa do projeto informacional da metodologia de projeto apresentada se encerra com o estabelecimento da especificação de projeto que deve traduzir as necessidades mais relevantes obtidas dos usuários bem como os requisitos de projeto necessários ao produto que se deseja, numa linguagem em que estas necessidades possam ser melhores detalhadas e trabalhadas nas etapas seguintes da metodologia citada, resultando deste modo num produto mais fiel às necessidades originais pretendidas. No presente caso a escolha desta relevância foi obtida a partir da utilização da ferramenta FMECA para os principais modos de falha do sistema de reação térmica

da U-36, que auxiliou na definição da lista de especificação apresentada. Deste modo o detalhamento e implementação das alterações sugeridas e já priorizadas resultará numa melhoria da disponibilidade operacional da U-36.

Pode ser observado que todas as medidas propostas estão relacionadas com a capacitação da unidade para possibilitar a realização de sua limpeza e hibernação, evitando-se assim a obstrução decorrente da solidificação do enxofre que ocorre nesta unidade após as paradas não programadas. Conforme já citado anteriormente, os plugueamentos efetuados nos condensadores e na caldeira de recuperação de calor regularizaram a temperatura de processo do enxofre nestes equipamentos, solucionando assim o problema de obstrução que ocorria durante a operação da unidade. Entretanto devido à grande dependência operacional da U-36 em relação à U-39 decorrente do gás ácido e ar de combustão fornecidos por esta última, toda parada operacional da U-39 além de provocar também a parada da U-36 gera a sua incapacidade em efetuar a limpeza no interior dos seus equipamentos e da sua tubulação, o que causa a obstrução e um acentuado processo corrosivo nos seus equipamentos, resultando na necessidade de novas intervenções de manutenção, acentuando-se assim a piora da sua disponibilidade devido à precariedade da sua manutenibilidade.

Vale assim destacar que dentre as medidas que compõe a especificação do reprojeto da U-36, a instalação de sopradores de ar de combustão pertencentes à própria unidade assume fundamental importância na solução dos problemas de disponibilidade da unidade, uma vez que apesar desta medida não acabar completamente com a dependência operacional em relação à U-39, a mesma possibilitará a limpeza e hibernação adequada da unidade após a parada não programada de qualquer uma de suas unidades fornecedoras de gás ácido, evitando-se deste modo os problemas que têm acarretado em sua baixa disponibilidade.

CAPÍTULO 8**CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES****8.1 Introdução**

O trabalho apresentado nesta dissertação surgiu da necessidade de desenvolvimento de uma metodologia para especificação do problema de reprojetado de uma unidade de recuperação de enxofre visando a melhoria da disponibilidade operacional, estando esta demandada principalmente pela necessidade de mudança da estratégia de gestão de manutenção, de modo a sustentar as mudanças de projeto necessárias à melhoria da confiabilidade operacional e disponibilidade requeridas. Esta metodologia pretendeu chegar às especificações preliminares que deverão ser detalhadas posteriormente em etapas de projeto subseqüentes e que após as suas respectivas implementações, resultarão na melhoria da disponibilidade operacional desejada.

Utilizou-se como elemento de pesquisa a unidade de recuperação de enxofre (U-36) da refinaria Landulpho Alves da Petrobras que apresenta uma baixa disponibilidade resultante da baixa confiabilidade operacional e da difícil manutenibilidade apresentadas por esta unidade. Apresenta ainda alguns desvios em relação aos requisitos de projeto originais como, por exemplo, a sua inadequação em processar todos os tipos de gás ácido previstos originalmente, além de outros desvios da função requerida para esta unidade, só possíveis de resolução com a realização de algumas alterações de projeto.

Recapitulando-se dentre os objetivos propostos para esta dissertação, a estruturação das informações necessárias para utilização na fase do projeto informacional visando o reprojetado da U-36 foi um dos seus objetivos principais, tendo ainda como medidas auxiliares a elaboração do estudo dos modos e efeitos das falhas associados com o problema de disponibilidade apresentado pela unidade e a realização de uma análise funcional da U-36 para possibilitar visualizar de uma forma mais sistemática, os principais desvios existentes em relação às suas especificações originais.

Para elaboração e desenvolvimento desta metodologia, foi necessário aprofundar-se nos conhecimentos existentes relativos à análise funcional e metodologias de projeto, tendo sido escolhida a metodologia de projeto de produtos do Nedip, por já ter sido a mesma testada em diversos outros trabalhos com resultados satisfatórios, além de se encaixar plenamente nas circunstâncias e características que envolviam as condições existentes.

Pode ser citado, por exemplo, que a falta de um banco de dados na unidade, onde se encontrassem registradas de modo sistemático as falhas responsáveis pela sua baixa disponibilidade, foi contornada com a elaboração de questionários estruturados e pesquisas não estruturadas. A metodologia de projeto proporcionou esta possibilidade de modo que se pudesse explorar o conhecimento existente nas equipes de manutenção, operação e projeto, levantando-se ainda os históricos de manutenção e a identificação das dificuldades nas ações de manutenção para poder melhor identificar e caracterizar as falhas ocorridas. Assim foi possível racionalizar as percepções destes importantes atores do processo, a respeito dos problemas reais que afetam a disponibilidade da unidade. De alguma forma a pesquisa recuperou por meio destes atores a memória da empresa, no tocante a U-36 e as especificidades deste trabalho. Todas estas informações levantadas foram utilizadas para a obtenção das informações e especificações previstas na etapa de projeto informacional da referida metodologia de projeto. Os conhecimentos relativos à análise funcional foram úteis na identificação e definição dos principais desvios de função existentes, e a ferramenta de confiabilidade FMECA foi necessária para priorização dos desvios e ações recomendadas que mais afetam a melhoria da disponibilidade da U-36.

Entretanto à medida que o trabalho foi sendo desenvolvido algumas dificuldades ficavam evidentes, como por exemplo:

- A falta de informações específicas em um banco de dados da unidade das principais falhas da U-36 que comprometem a sua disponibilidade.
- Não se ter encontrado fora do âmbito da Petrobras, experiências similares à pretendida relativa à melhoria de disponibilidade em unidades de recuperação de enxofre, tendo que se utilizar experiências advindas de unidades de processamento petroquímico e de refino de petróleo.

- O longo período de paralisação a que esteve submetida a U-36 durante o período considerado, reduziu a possibilidade de análise das ocorrências de falha possíveis, limitando o estudo dos desvios às ocorrências de falha verificadas.

8.2 Avaliação dos resultados obtidos

A fim de se verificar a consistência dos resultados obtidos neste trabalho bem como avaliar a validade destes resultados, foi aplicado um segundo questionário a 21 pessoas representantes das equipes envolvidas com a operação, manutenção e engenharia da U-36, sendo que destes apenas 4 haviam participado da FMECA realizada. Tal questionário visava confirmar se as ações e informações recomendadas para detalhamento nas etapas seguintes necessárias ao reprojeto da U-36 estavam efetivamente relacionadas com os problemas apresentados pela unidade, e se os resultados obtidos com a implantação das mesmas resultariam na melhoria da disponibilidade requerida da U-36.

Os resultados obtidos da aplicação deste questionário confirmaram que as ações recomendadas bem como a priorização definida quanto à ordem de implementação destas ações estavam de acordo com a percepção deste grupo. Deve-se salientar ainda que das ações mencionadas, aquelas relacionadas com a instalação dos compressores de ar de combustão na própria unidade bem como a que indica a necessidade de mudança da especificação para aço-carbono para os componentes dos condensadores e caldeira citadas acima foram as indicadas no questionário como as que produzirão um resultado mais efetivo. Houve também concordância do grupo entrevistado com todas as ações propostas, ratificando deste modo os resultados obtidos com o método proposto.

8.3 Conclusões

Os resultados alcançados com a metodologia apresentada nesta dissertação quanto à definição das informações necessárias ao projeto informacional foram satisfatórios uma vez que se obteve as informações da forma sistematizada pela metodologia proposta, estando as mesmas coerentes com o pensamento das equipes envolvidas com a operação, manutenção e projeto da unidade, além de respaldada nas referências bibliográficas relacionadas com o tema de operação e projeto de unidades de recuperação de enxofre apresentadas. Obviamente que o sucesso efetivo pretendido, ou seja, o aumento da disponibilidade operacional da U-36, só poderá ser confirmado a

partir da execução das etapas de projeto posteriores da referida metodologia de projeto apresentada e execução física das alterações propostas.

Quanto às questões preliminares levantadas no capítulo 1 referentes à adequação da vazão real de gás ácido fornecida à U-36, pode ser constatado a partir das informações de campo obtidas que as alterações já efetuadas na unidade com o redimensionamento de alguns dos seus equipamentos, notadamente condensadores e caldeira de recuperação de calor (plugueamento parcial realizado em torno de 30% dos tubos destes equipamentos), possibilitaram a adequação destes à vazão real atual de gás ácido fornecida, corrigindo-se as temperaturas ao longo destes equipamentos e evitando-se desta forma a ocorrência de solidificação de enxofre durante operação da unidade. Na especificação sugerida no capítulo 7, encontram-se ações que visam corrigir alguns dos desvios levantados nas questões preliminares relacionadas a este assunto como a questão da automatização do controle da vazão de gás ácido no processo, pela instalação de válvulas de controle de fluxo nos acumuladores de gás ácido localizados na entrada da unidade. Também foi sugerido o redimensionamento dos condensadores e caldeira de recuperação de calor, além da implantação de um sistema automatizado que permita efetuar o controle de modo contínuo do teor de HC de cada uma das correntes de gás ácido enviadas à U-36. Conforme informações obtidas, as modificações até aqui já efetuadas no processo da U-6 que possibilitaram a adequação do teor de hidrocarbonetos do gás ácido ao requerido pela U-36, permitiram também que a U-36 já consiga operar de modo estável com as vazões de gás ácido fornecidas pelas U-39 e U-6, confirmando não só a veracidade das questões preliminares levantadas, como também que as medidas especificadas relacionadas com estes desvios. Estas ações devem proporcionar resultados satisfatórios, uma vez que as mesmas procuram resolver o problema de forma mais definitiva.

Pode ser concluído ainda, a partir da análise das falhas e dos desvios de função levantados, que o maior problema que afeta a disponibilidade atual da U-36 está principalmente relacionado com a sua incapacidade em realizar a limpeza dos seus sistemas e equipamentos após as paradas programadas e não programadas, o que está diretamente relacionado com o atributo ou característica de manutenibilidade. As especificações já apresentadas e que se encontram listadas abaixo visam corrigir, a partir dos seus respectivos detalhamentos, este citado desvio:

13. Dispor de sopradores de ar de combustão compatíveis com a vazão requerida pelo processo e pertencentes à própria U-36.
14. Dispor as linhas e condensadores de drenos para o enxofre líquido, devidamente, posicionado e dimensionado.
15. Dispor os tampos dos condensadores de dispositivos que possibilitem acesso completo ao espelho sem a necessidade de desmontagem dos mesmos, a fim de possibilitar a agilização de limpezas e desobstruções eventualmente necessárias.

Portanto, a lista de especificações para reprojetado da U-36 obtida no capítulo 7, foi resultante da metodologia aplicada nesta dissertação, sendo considerada o principal produto da mesma, abrangendo assim os desvios que mais têm impactado a sua disponibilidade, podendo-se assim considerar a partir dos resultados a serem alcançados como seu detalhamento e implementação, ter se atendido a todos os objetivos propostos no capítulo 1 desta dissertação.

Outra importante conclusão a que se chega é que devido ao fato do método proposto nesta dissertação basear-se em algumas metodologias de abrangência mais geral (análise funcional, metodologia de projeto, etc.) a sistemática apresentada para o caso em questão da U-36 pode ser utilizada para análise de casos similares em unidades industriais em geral, caracterizados pela necessidade de melhoria de disponibilidade operacional, decorrentes da necessidade de realização de algum reprojetado nas mesmas.

8.4 Sugestões para trabalhos futuros

Baseados nos estudos e pesquisas realizados nesta dissertação serão listadas a seguir, sugestões para utilização em trabalhos futuros visando aperfeiçoar ou complementar os objetivos propostos pela mesma:

- a) desenvolver e aplicar modelos matemáticos baseados em distribuições probabilísticas que possibilitem caracterizar a necessidade de realização de reprojetado em unidades industriais a partir do levantamento dos intervalos de paralisação/operação das mesmas.
- b) aplicação desta metodologia com a utilização das demais etapas da metodologia de projeto apresentado, possibilitando assim oferecer resultados ainda mais objetivos e de aplicação mais imediata às unidades aonde for ser aplicada, além de uma avaliação quanto a seus resultados medida diretamente pela melhoria dos atributos de manutenção a que se deseja alcançar.

ANEXO I

**QUESTIONÁRIO SOBRE CAUSAS E ALTERNATIVAS DE SOLUÇÃO PARA
OS PROBLEMAS VERIFICADOS NA U-36**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
MESTRADO ENGENHARIA MECÂNICA
ALUNO:UBIRAJARAOLIVEIRA PINHEIRO

1. Os problemas de baixas confiabilidade e disponibilidade operacional da U-36 estão relacionados basicamente a divergências existentes em algumas variáveis operacionais entre os valores previstos em projeto e os efetivamente obtidos nas condições reais de operação. A divergência em torno da vazão de gás ácido fornecida pela U-39 pode ser apontada como uma das principais causas destes problemas existentes, afetando diversas outras variáveis operacionais que acarretam obstruções, etc. ao longo da unidade, provocando inúmeras paradas operacionais à U-36.

☐ Concordo integralmente ☐ Concordo parcialmente

☐ Não concordo

Observações: _____

2. Pode-se afirmar que a divergência decorrente do teor de H_2S da corrente de gás ácido enviado pela U-39 (previsão de projeto de 72% contra uma concentração real existente de 39%) é a principal causa dos problemas de obstrução da U-36 devido aos desequilíbrios provocados por esta divergência nas reações térmicas de conversão de enxofre, ocasionando temperaturas de condensação mais baixas que as previstas e consequentemente obstruções ao longo das linhas e equipamentos da unidade.

☐ Concordo integralmente ☐ Concordo parcialmente

☐ Não concordo

Observações: _____

ANEXO I

QUESTIONÁRIO SOBRE CAUSAS E ALTERNATIVAS DE SOLUÇÃO PARA OS PROBLEMAS VERIFICADOS NA U-36

3. Uma das formas de compensar e equilibrar a divergência existente nas características do gás ácido proveniente da U-39 pode ser a adequação das correntes de gás ácido disponíveis na U-6 e U-80 para possibilitar suas utilizações na U-36, o que poderá compensar a deficiência no teor de H_2S ou o valor total da vazão de gás ácido fornecido (atualmente apenas a U-39 alimenta a U-36 resultando em aproximadamente 80% da capacidade total prevista para a U-36).

☐

Concordo integralmente

☐

Concordo parcialmente

☐

Não concordo

Observações:

4. O sistema de reação térmica, mais especificamente os condensadores, são os equipamentos da U-36 onde se localizam as maiores falhas de dimensionamento da URE, e conseqüentemente aonde ocorrem as maiores taxas de obstrução nesta unidade. Daí a necessidade de redimensionamento destes equipamentos para solução dos problemas de obstrução verificados na unidade.

☐

Concordo integralmente

☐

Concordo parcialmente

☐

Não concordo

Observações:

ANEXO I

**QUESTIONÁRIO SOBRE CAUSAS E ALTERNATIVAS DE SOLUÇÃO PARA
OS PROBLEMAS VERIFICADOS NA U-36**

5. A maior dificuldade da U-36 está na falta de conhecimento operacional para promover a sua hibernação adequada após uma parada de emergência da U-39, acarretando em limpeza e inertização deficientes para a unidade, o que após o resfriamento da mesma provoca a solidificação do produto e corrosão no interior dos equipamentos e linhas, o que compromete o processo posterior de partida da unidade.

☐ Concordo integralmente ☐ Concordo parcialmente

☐ Não concordo

Observações: _____

6. As deficiências no projeto da U-36 que impossibilitam permitir um processo rápido e eficiente de hibernação e limpeza da U-36 após as paradas de emergências, provocam a solidificação de depósitos no interior dos equipamentos e linhas da unidade, acarretando um processo de obstrução e corrosão no interior dos mesmos o que dificulta e retarda ainda mais o condicionamento e partida posterior desta unidade, resultando desta forma numa baixa taxa de manutenibilidade para a U-36.

☐ Concordo integralmente ☐ Concordo parcialmente

☐ Não concordo

Observações: _____

ANEXO I

QUESTIONÁRIO SOBRE CAUSAS E ALTERNATIVAS DE SOLUÇÃO PARA OS PROBLEMAS VERIFICADOS NA U-36

7) As dificuldades de projeto para inertização e limpeza da U-36 após uma parada não programada desta unidade acham-se mais localizadas nos condensadores e reatores catalíticos acarretando deste modo nestes equipamentos, os maiores problemas de obstrução e corrosão e consequentemente as maiores taxas de falha desta unidade.

☐ Concordo integralmente ☐ Concordo parcialmente

☐ Não concordo

Observações: _____

8) O projeto da U-36 para permitir a inertização e limpeza da unidade não está compatível com o modelo de operação vigente (mesma equipe de operação para ambas as unidades 39 e 36), pois devido à total dependência operacional da U-36 em relação à U-39, durante uma parada não programada da U-39 e que consequentemente acarreta uma parada à U-36, existe certo atraso no início das providências cabíveis para limpeza e inertização desta última em função da equipe operacional disponível se encontrar envolvida com a U-39. Como a automatização para permitir a limpeza e inertização da U-36 é deficiente, ficam assim as mesmas comprometidas por este atraso, acarretando desta forma os problemas de obstrução e corrosão existentes.

☐ Concordo integralmente ☐ Concordo parcialmente

☐ Não concordo

Observações: _____

ANEXO I

**QUESTIONÁRIO SOBRE CAUSAS E ALTERNATIVAS DE SOLUÇÃO PARA
OS PROBLEMAS VERIFICADOS NA U-36**

9. A solução de redimensionamento dos condensadores e caldeira de recuperação de vapor da U-36 efetuada através do plugueamento parcial destes equipamentos não se mostrou efetiva como solução do problema de baixa disponibilidade operacional e confiabilidade da U-36 haja vista que não houve melhoria destes indicadores após adoção desta medida.

☐

Concordo integralmente

☐

Concordo parcialmente

☐

Não concordo

Observações: _____

ANEXO II- FMECA

Função	Modo de Falha	Efeito	Sev.	Causas/Mecan.de Falha	Ocorr.	Controles	Detec.	NPR	Ações recomendadas
1.Condensar o enxofre e permitir o fluxo livre do mesmo através dos equipamentos sem poluir o meio-ambiente;	1.1Perda de escoamento através dos condensadores;	1.1 Obstrução nos condensadores;	8	1.1.1Temperatura do enxofre mais baixa que a especificada devido à baixa vazão de gás ácido;	4	Ajuste da temperatura através do controle da vazão do gás ácido;	6	192	1.1.1.1 Ajustar válvula de controle de fluxo de gás ácido na saída do acumulador F-3601em função da temperatura de saída do quarto condensador;
				6			192	1.1.1.2 Controlar pressão do tambor de gás ácido F-3601 mantendo-a dentro dos valores previstos no projeto da unidade;	
				6			192	1.1.1.3 Viabilizar o aumento de vazão de gás ácido a partir da adequação das correntes não utilizadas da U-6 e U-80.	
			8	1.1.2 Resíduo de enxofre solidificado no interior de linhas e equipamentos após a parada da unidade;	9	Melhoria no processo de limpeza interna dos equipamentos e linhas durante as paradas da unidade;	9	648	1.1.2.1 Instalar compressor de ar de combustão pertencente à própria U-36; 1.1.2.2 Possibilitar a drenagem adequada do interior dos equipamentos com a instalação e drenos e bloqueios apropriados nos pontos mais baixos e de maior dificuldade de circulação, visando-se facilitar a limpeza no interior dos mesmos;
4	288	1.1.2.3Instalar tomadas para injeção de ar de combustão nos pontos críticos mais sujeitos à obstrução devido à solidificação de enxofre;							

ANEXO II- FMECA

Função	Modo de Falha	Efeito	Sev.	Causas/Mecan.de Falha	Ocorr.	Controles	Detec.	NPR	Ações recomendadas
			8	1.1.3 Inclinação inadequada das linhas e dos condensadores com relação ao sentido de fluxo de gás ácido ;	4	Inclinação das linhas e dos condensadores;	4	128	1.1.3.1 Checar se inclinação das linhas e condensadores no sentido de fluxo são de ¼ de polegada por pé de comprimento considerado;
			8	1.1.4 Condensadores mal dimensionados acarretando velocidades de fluxo mais baixas que a especificada;	4	Verificação da velocidade de fluxo através de visores de instalados nos equipamentos;	4	128	1.1.4.1 Instalar visores de fluxo nos condensadores para permitir melhor controle de vazão em cada um dos condensadores;
					4	Verificar o dimensionamento dos condensadores segundo as vazões de gás ácido previstas em projeto;	6	192	1.1.4.2 Checar os condensadores quanto ao correto dimensionamento da sua área de troca em relação ao fluxo previsto de gás ácido ;
			8	1.1.5 Danos dos demisters (telas) existentes na saída dos condensadores;	4	Análise dos demisters localizados na saída dos condensadores;	4	128	1.1.5.1 Verificar efetividade do sistema de fixação dos demisters;
							4	128	1.1.5.2 Verificar adequação do “mesh” dos demisters utilizados;
							4	128	1.1.5.3 Confirmar real necessidade de existência de demisters em projetos de unidades de recuperação e enxofre;

ANEXO II- FMECA

Função	Modo de Falha	Efeito	Sev.	Causas/Mecan.de Falha	Ocorr.	Controles	Detec.	NPR	Ações recomendadas
			8	1.1.6 Temperatura do gás ácido mais baixa que a especificada devido ao baixo teor de H ₂ S do gás ácido empregado;	4	Análise do teor de H ₂ S em cada uma das correntes de gás ácido enviadas à U-36;	6	192	1.1.6.1 Ajustar válvula de controle de fluxo de gás ácido na saída do acumulador F-3601 em função da temperatura de saída do quarto condensador
							6	192	1.1.6.2 Instalar sistema para efetuar análise individualizada quanto ao teor de H ₂ S para as correntes de gás ácido das unidades 6,39 e 80, condicionando os seus envios à U-36 apenas quando estiverem de acordo com a especificação prevista;
							6	192	1.1.6.3 Criação de um sistema de armazenamento de gás ácido individualizado na entrada da U-36 para cada uma das unidades fornecedoras, com capacidade de desvio para reprocesso das parcelas fora de especificação;
	1.2 Obstrução no sistema de enxofre a jusante dos condensadores;		8	1.2.1 Corrosão nos tubos dos condensadores;	4	Especificação dos materiais do feixe tubular;	9	288	1.2.1.1 Alterar a especificação do material dos feixes e espelhos dos condensadores para aço-carbono, aumentando também as suas respectivas espessuras;
			8	1.2.2 Falha na junta do cabeçote;	2	Inspeção visual sistemática do equipamento	4	64	1.2.2.1 Alterar a especificação da junta do cabeçote dos condensadores para uma do tipo maciça serrilhada também em aço-carbono.

ANEXO II- FMECA

Função	Modo de Falha	Efeito	Sev.	Causas/Mecan.de Falha	Ocorr.	Controles	Detec.	NPR	Ações recomendadas
			8	1.2.3 Falha na solda de selagem tubo-espelho do condensador devido à corrosão;	4	Projeto da junta de selagem por solda tubo-espelho dos condensadores;	4 6	64 192	1.2.2.2 Inspecionar a superfície dos cabeçotes e flange do casco do trocador; 1.2.3.1 Alterar o projeto da solda de selagem, reforçando-a e adequando-a à nova especificação dos materiais do espelho e tubos do feixe;
2. Converter em enxofre o SO ₂ que sai dos pré-aquecedores;	2.1 Perda de circulação através dos reatores;	2.1 Obstrução dos reatores;	8	2.1.1 Desmoronamento das telas localizadas na entrada dos reatores;	3	2.1.1 Sistema de suportes das telas;	4	96	2.1.1.1 Melhorar o sistema de suportes das telas, tornando-o mais resistente; 2.1.1.2 Verificar adequação do "mesh" das telas utilizadas;
	2.2 Enxofre produzido fora de especificação;	Enxofre com coloração escura;	5	2.2.1 Gás ácido apresentando teores de hidrocarbonetos maiores que o especificado;	5	2.2.1 Controle do teor de HC do gás ácido fornecido à U-36;	6 6	150 150	2.2.1.1 Criação de sistema de controle contínuo da especificação de cada uma das correntes de gás ácido enviadas à U-36; 2.2.1.2 Criação de um sistema de armazenamento de gás ácido individualizado para cada uma das unidades fornecedoras, com capacidade de desvio para reprocesso das parcelas fora de especificação;

ANEXO II- FMECA

Função	Modo de Falha	Efeito	Sev.	Causas/Mecan.de Falha	Ocorr.	Controles	Detec.	NPR	Ações recomendadas
3. Converter em SO ₂ um terço do H ₂ S presente na corrente de gás ácido enviado à U-36;	3.2 Perda de circulação através da caldeira de recuperação de calor;	3.2.1 Obstrução	8	3.2.1 Temperatura do enxofre mais baixa que a especificada;	4	3.2.1 Ajuste da temperatura através da vazão de gás ácido;	6	192	3.2.1.1 Controlar pressão do tambor de gás ácido F-3601 mantendo-a dentro dos valores previstos no projeto da unidade;
4. Bombear o enxofre líquido do tanque F-3611 de armazenamento no interior da unidade para o pátio externo de armazenamento de enxofre;	4.1 Perda de circulação;	4.1.1 Enchimento do F-3611 acarretando a paralisação da U-36;	8	4.1.1 Falha da bomba centrífuga J-3602;	4	3.2.2 Dimensionamento da caldeira de recuperação em relação à vazão prevista de gás ácido;	6	192	3.2.2.1 Checar a caldeira de recuperação de calor quanto ao correto dimensionamento da sua área de troca em relação ao fluxo previsto de gás ácido ;
					2	4.1.1 Verificação do nível do tanque F-3611;	4	64	4.1.1.1 Regulagem do pressostato da bomba centrífuga para permitir o acionamento da mesma em intervalos menores que o atual ;
					2	4.1.2 Funcionamento da bomba centrífuga;	4	64	4.1.2.1 Manter a bomba stand-by em condições permanentes de uso; 4.1.2.2 Verificação e adequação do selo mecânico da bomba;